

00565
1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
CIENCIAS QUÍMICAS

APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN EL
ANÁLISIS DE VARIABLES CLAVE PARA EL CONTROL
DE CALIDAD: EL CASO DE ASIENTOS
AUTOMOTRICES.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS QUIMICAS
(FARMACIA-CONTROL DE MEDICAMENTOS)
P R E S E N T A :
Q.F.B. JOSE RIVELINO FLORES MIRANDA

296257

TUTOR: DR. CARLOS E. ESCOBAR TOLEDO



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**APLICACIÓN DEL DISEÑO DE
EXPERIMENTOS EN EL ANALISIS DE
VARIABLES CLAVE PARA EL CONTROL DE
CALIDAD: EL CASO DE ASIENTOS
AUTOMOTRICES.**

ÍNDICE GENERAL

Capítulo	Sección	Página
	Índice de Figuras	i
	Índice de Tablas	iii
	Dedicatorias	vi
	Agradecimientos	viii
0.0	Resumen	1
0.1	Abstract	3
1.0	Antecedentes	5
2.0	Objetivos e Hipótesis	12
3.0	Metodología	14
4.0	Primera Parte: Dispersión de la Medición	26
4.0.1	Estudio de la capacidad del instrumento INSTRON	27
4.0.2	Estudio de la influencia de las condiciones hidrotérmicas sobre la medición de la dureza	32
4.1	Segunda Parte: Dispersión debida al proceso de fabricación	46
4.1.1	Estudio de la influencia del tipo de vaciado en las líneas de fabricación 5 y 6	47
4.1.2	Diseño experimental con tres factores	48
4.1.3	Diseño de experimentos con dos factores	53
4.1.4	Análisis de variancia	54
4.1.5	Prueba de confirmación del efecto de la temperatura del molde	56
4.1.6	Estudio del efecto del molde	57
4.1.7	Análisis de las causas de la dispersión debida a los moldes	57
4.1.8	Estudio de la influencia de la tasa de activador (catalizador)	59
5.0	Conclusiones	64
6.0	Bibliografía	66
7.0	Anexos	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Número de Figura	Descripción	Página
1	Dispersión de la medición de la dureza de CAVJ64	30
2	Dispersión de las mediciones de Altura Bajo Peso (HSP) a 300N de CAV948	31
3	Efecto de la Humedad Relativa (HR) sobre la dureza de CAVJ64	38
4	Efecto de la Temperatura sobre la dureza de CAVJ64	39
5	Efecto de la Humedad Relativa (HR) sobre la dureza de CAV948 a 300N	40
6	Efecto de la Temperatura sobre la dureza de CAV948 a 300N	41
7	Efecto de la Humedad Relativa (HR) sobre la dureza de CAV 948 a 750N	42
8	Efecto de la Temperatura sobre la dureza de CAV948 a 750N	43
9	Dispersión debida al tipo de Vaciado	49
10	Efectos estimados sobre la media de E 300N	51
11	Efectos estimados sobre la dispersión (desviación estándar) de E 300N	52
12	Variación de la Altura Bajo Peso a 1 Hora (HSP 1H) en función de la cantidad de catalizador	60
13	Variación del Hundimiento (E) a 300N en función de la cantidad de catalizador	61
14	Correlación entre los resultados de E 300N y HSP 1H	62

ÍNDICE DE TABLAS

Número De Tabla	Descripción	Página
1	Capacidad de la medición de la dureza del cojín CAV J64	29
2	Capacidad de la medición de la dureza del cojín CAV 948	29
3	Capacidad de la medición de la dureza del cojín CAV 948 después del cambio del modo de operación	29
4	Niveles seleccionados para los factores en estudio	32
5	Matriz de experimentos para el cojín CAV J64	33
6	Matriz de experimentos para el cojín CAV 948	33
7	Tabla de respuestas y cálculo de los efectos de los factores para el cojín CAV J64 (E 300N)	33
8	Tabla de respuestas y cálculo de los efectos de los factores para el cojín CAV 948 (HSP 300N)	34
9	Tabla de respuestas y cálculo de los efectos de los factores para el cojín CAV 948 a (HSP 500N)	34
10	Tabla de respuestas y cálculo de los efectos de los factores para el cojín CAV 948 (HSP 750N)	34
11	Análisis de variancia de los factores humedad relativa y temperatura con repetición de experimentos para CAV J64	35
12	Análisis de variancia de los factores humedad relativa y temperatura con repetición de experimentos para CAV 948 a 300 N	36
13	Análisis de variancia de los factores humedad relativa y temperatura con repetición de experimentos para CAV 948 a 750 N	36
14	Resultados de pruebas complementarias	37
15	Niveles seleccionados para los factores en estudio	48
16	Matriz de experimentos para el cojín CAV J64	50
17	Niveles seleccionados para los factores en estudio (CAV J64)	53
18	Niveles seleccionados para los factores en estudio (CAV 948)	53
19	Matriz del diseño experimental para CAV J64	53
20	Matriz del diseño experimental para CAV 948	54
21	Análisis de variancia de los factores molde y temperatura del molde con repetición de experimentos para CAV J64	55

Número De Tabla	Descripción	Página
22	Análisis de variancia de los factores molde y temperatura del molde con repetición de experimentos para CAV 948	56
23	Análisis de variancia para un factor: la temperatura del molde (CAV J64)	57
24	Análisis de variancia del factor molde para el cojín CAV J64	58
25	Análisis de variancia del factor molde para el cojín CAV 948	58

DEDICATORIAS

A mi amada esposa Gladys por su apoyo incondicional, sus consejos
y su compañía.

A mis padres Víctor y Elia por su ejemplo y apoyo.

A mi hermana Claudia por sus consejos y su entusiasmo inspirador.

A mi tío Arturo por su ejemplo de fortaleza espiritual y gran
inteligencia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), quién me dio la oportunidad de continuar con mi formación profesional.

Agradezco el apoyo otorgado por la empresa Renault por proporcionarme información valiosa para el desarrollo de esta tesis.

Asimismo agradezco a mi asesor de tesis Dr. Carlos E. Escobar Toledo, por su tiempo, apoyo y conocimientos.

Finalmente quiero agradecer a los miembros de mi Jurado de tesis por sus observaciones y sugerencias.

0.0 RESUMEN

Resumen:

Los métodos de diseño de experimentos tienen un propósito importante en el desarrollo y en la optimización de procesos. En muchos casos, el objetivo puede ser el desarrollo de un proceso consistente o robusto; es decir, un proceso afectado mínimamente por fuentes de variabilidad.

En el presente trabajo se aplican técnicas de diseño de experimentos y análisis de variancia para estudiar las posibles fuentes de variabilidad que afectan los valores de dureza final de un producto basado en espumas de poliuretano y que tiene como uso final, ser parte de los asientos empleados en la Industria Automotriz.

También se emplean herramientas de calidad tales como los diagramas Causa-Efecto y la técnica de Lluvia de Ideas para el estudio del problema planteado en cuanto a la variación en los valores de dureza para el producto mencionado.

El trabajo se divide en dos partes:

- a) En la primera parte se evalúa la capacidad del sistema de medición de la dureza de las acolchonaduras, así como los factores que pueden influir en dicha medición.
- b) La segunda parte se enfoca en la dispersión debida al proceso de fabricación. Para ello se estudiaron los efectos de los factores que influyen en la fabricación de dichos cojines.

En las dos partes mencionadas se analizan dos diferentes tipos de cojines tomando como variable de respuesta la dureza. Mediante sesiones de expertos y aplicando la técnica de Lluvia de Ideas se establecieron los factores que se consideraron pertinentes y mediante el diseño de experimentos se determinaron los ensayos necesarios para analizar los factores establecidos. Tanto en la parte correspondiente al estudio del sistema de medición de la dureza como en la parte en la que se analiza al proceso de fabricación se encontraron varios factores que influyen de manera notable en la variación obtenida en los valores de dureza del producto final.

Con respecto al sistema de medición se encontró que los factores que contribuyen en mayor medida a la variación de la dureza, son las condiciones hidrotérmicas bajo las cuales se efectúan las mediciones, y dentro de esta misma parte se propone una ecuación de corrección por temperatura para ajustar los valores de dureza obtenidos de acuerdo a la temperatura real a la que se efectuó la medición.

En cuanto al proceso de fabricación se encontró que los factores mas importantes en cuanto a la dureza son el molde y la temperatura de éste último.

0.1 ABSTRACT

Abstract:

The experimental design methods have an important purpose in process development and improvement. There are several cases where the objective can be to develop a consistent, robust process, in other words, a process with the smallest variation.

This work shows the application of experimental design methods and variance analysis to study the possible variability sources that affect final hardness values of a product based on polyurethane foams. These foams are used for seat and back cushions for automobiles and trucks.

Also, in this work we use quality tools such as the Fishbone Diagram and brainstorm Techniques for analysis of the mean problem related with variation in final hardness values.

This work is divided in two parts:

- a) At first part, the measurement system capability is evaluated, as well as the mean factor that affects hardness measurement.
- b) At second part we evaluate the variation due to manufacturing process. Also we studied the effects of the factors that exert influence on such a process.

The response variable measured in all assays was hardness. At the first time, Expert Groups using brainstorm Techniques established the possible factors that exert influence on hardness. Once the factors were established, we apply experimental design methods to study such factors. Along the development of this work, we founded several factors that effectively exert influence on hardness.

The data analysis shows, that temperature and relative humidity were the mean factors related with variation due to measurement system. We then propose a useful equation to fit the values of hardness measurements in accord to the real temperature of the process. On the other hand, we founded that mold temperature and mold itself were the most important factors that affect manufacturing process.

1.0 ANTECEDENTES

Antecedentes:

La competencia en todos los sectores productivos es cada vez más fuerte, lo que obliga a las empresas que desean participar en ella, a adaptarse a un entorno cambiante con nuevas estrategias que les permitan aventajar a sus competidores.

El caso de la Industria Automotriz es particularmente interesante en cuanto a las estrategias adoptadas por los grandes consorcios automotrices para seguir compitiendo exitosamente en sus respectivos mercados.

En el caso de la Renault, esta empresa de origen francés está realizando enormes esfuerzos para posicionarse como una de las empresas automotrices más importantes del mundo. Como parte de dichos esfuerzos, la empresa mencionada pretende establecer plantas armadoras distribuidas estratégicamente en diferentes países.

México, por su posición geográfica estratégica y por su enorme potencial para la inversión, es uno de los países en los que la Renault se encuentra interesada para establecerse y desarrollarse.

El plan para el establecimiento de la Renault en México es muy ambicioso y en él se contempla como parte fundamental de su estrategia el desarrollo de proveedores locales para algunos de los componentes automotrices.

Para poder efectuar lo anterior la empresa Renault solicita el apoyo del Instituto Nacional Politécnico de Toulouse, en donde se ponen en contacto con el Dr. Carlos E. Escobar Toledo para solicitar su colaboración con la Renault en su estrategia de desarrollo de proveedores en nuestro país.

El primer problema planteado por la Renault fue la identificación de las partes automotrices con posibilidades de ser producidas en México. Para ello la Renault le envió al Dr. Escobar información con respecto a las partes automotrices que les interesaba que pudieran ser producidas en nuestro país. De la lista mencionada se seleccionaron los cojines utilizados en los asientos de los automóviles como primer caso de estudio, ya que la base de dichos cojines es la producción de espumas flexibles de poliuretano, el cual es un proceso relativamente fácil de desarrollar y controlar.

Una vez realizada la selección del primer caso de estudio el Dr. Escobar solicitó mas información relacionada con la fabricación de los cojines mencionados. Cabe señalar que en Francia, el principal proveedor de cojines para asientos automotrices de la Renault es la empresa Bertrand Faure, a la cual nos referiremos en párrafos posteriores.

De la información remitida por la Renault pudimos conocer que el principal problema con el que se enfrenta su principal proveedor europeo es la dispersión en cuanto a la dureza final de los cojines. Es entonces cuando proponemos aplicar el diseño experimental, con ayuda de otras herramientas estadísticas, para encontrar soluciones prácticas a la problemática planteada, y que representa el objetivo fundamental de esta tesis. En este punto cabe señalar que se estableció una relación de colaboración muy estrecha con las personas involucradas en este proyecto en Francia, y gracias a ellos nos fue posible contar con los resultados necesarios para su análisis y discusión.

A continuación se describe a la principal empresa proveedora de cojines automotrices de la Renault en Francia.

Presentación del Grupo BERTRAND FAURE (BF).

Las actividades empresariales del grupo han estado orientadas a tres grandes ramas:

- Automóviles
- Equipajes DELSEY
- Aeronáutica (Ratier-Figeac).

En el área de automóviles, BF es uno de los líderes mundiales especializados en:

- Articulaciones automotrices
- Espumas automotrices
- Ranuras automotrices

Volumen de negocios.

El total de valores negociados por el grupo en 2000 ascendió a la cantidad de 14 500 millones de francos, lo que representa el 14% del volumen total de la industria de los asientos para el transporte en Europa. El grupo es un líder europeo de las siguientes áreas:

- Articulaciones automotrices: 24% del mercado mundial y 51% del mercado europeo.
- Espumas automotrices: 13% del mercado europeo.
- Ranuras automotrices: 17% del mercado mundial y 50% del mercado europeo.

Competidores.

Los principales competidores del grupo son:

- Johnson Control (14%)
- Lear Seating (10%)
- Keiper (7%)
- Delphi (Grupo General Motors)
- Rockwell
- Major (Grupo Johnson)

Actividad de la filial de Beaugency.

Esta filial se dedica a la producción de moldes acolchados utilizando espuma de poliuretano. Dichos moldes son utilizados básicamente en la fabricación de partes automotrices, principalmente asientos, pero también se utilizan en la fabricación de partes para el transporte en general.

Inicio de actividades. Enero de 1967.

Datos principales para el año 2000:

Total de volumen de negocios. 250 millones de francos. [MF]

Inversiones. 23.4 millones de francos [MF]

Volumen de piezas producidas por día. 1500 m³

Estrategia.

La empresa se encuentra involucrada en una dinámica de progreso planteada a tres años. Para ello cuentan con un plan de mejoramiento denominado FIB 21, con el cual buscan aumentar su competitividad basados en una estrategia de diferenciación.

Clientes.

En el sector automovilístico:

- Citroën
- Peugeot
- Renault
- Matra
- FIAT
- Fábricas JAT (Justo a Tiempo) del grupo

En el sector de transportes en general:

- SNCF (Ferrocarriles)
- RATP (Metro y Ferrocarril suburbano)
- COMPIN
- SOFANOR

Introducción.

De cara a una competencia cada vez mas fuerte en materia de rentabilidad y calidad, el grupo decidió involucrarse en un plan de excelencia conocido como FIB 21.

FIB 21 es un plan desarrollado para fomentar el progreso de la zona Franco-Ibérica del grupo, el cual contempla 21 acciones principales para afrontar con éxito los retos del siglo XXI. Las 21 acciones prioritarias se encuentran divididas en cuatro estrategias del plan de excelencia del grupo BF. Cabe señalar que los retos para esta empresa son mayores en cuanto a que cada uno de sus clientes le exige especificaciones diferentes para sus productos de acuerdo con las necesidades de cada uno de ellos.

El proyecto que se desarrolla en esta tesis se inscribe en la continuidad del plan y tiene por objetivo adaptar el proceso de fabricación de la espuma HR para la obtención de un producto final que satisfaga completamente las expectativas de los clientes. El presente trabajo se basa en una investigación de las causas de la dispersión en cuanto a los resultados de la evaluación de la dureza de la espuma HR y propone un plan de acción para su mejoramiento.

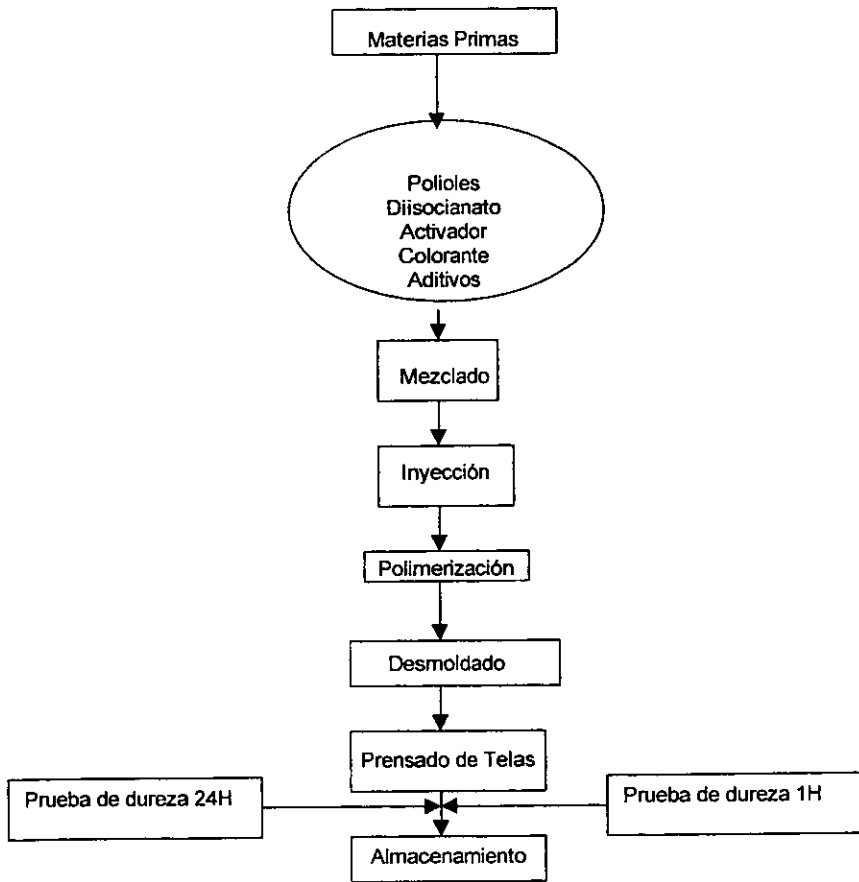
El trabajo se encuentra dividido en dos partes:

- c) En la primera parte se evalúa la capacidad del sistema de medición de la dureza de los cojines, así como los factores que pueden influir en dicha medición. También en esta parte se proponen acciones correctivas para mejorar la capacidad del proceso.
- d) La segunda parte se enfoca en la dispersión debida al proceso de fabricación. Para ello se estudiaron los efectos de los factores que influyen en la elaboración de dichos cojines. Para efectuar dicho estudio se empleó la técnica de diseño de experimentos y el análisis de variancia.

Desde este punto de vista se ha estudiado solamente la dureza, que es la característica mas importante de los requerimientos de los cojines de poliuretano. El objetivo del estudio es determinar las causas de la dispersión del proceso y obtener un valor de capacidad de proceso superior a 1.33.

A continuación se presenta un diagrama de flujo simplificado que muestra las diferentes etapas del proceso de fabricación de los cojines producidos a base de espuma de poliuretano.

Diagrama de flujo simplificado del proceso de fabricación de la espuma HR 95



Los poliuretanos, desarrollados originalmente para competir con el nylon, han encontrado un gran éxito en la preparación de espumas industriales. Su gran aceptación puede ser atribuida a sus excelentes propiedades físicas y químicas a un precio razonable y la relativa facilidad con la que pueden ser fabricadas. Las espumas de poliuretano se fabrican a base de materiales líquidos y están disponibles en una amplia variedad de tipos y formas, diseñadas para aplicaciones específicas. Los procesos para fabricar espumas de poliuretano han sido adaptados para la producción en plantas de fabricación tanto de bloques continuos como en forma de artículos moldeados, así como también se pueden producir espumas para aplicaciones especiales mediante un proceso de rociado en sitio.

Las espumas de poliuretano, salvo algunas muy especializadas, se preparan a partir de isocianatos aromáticos y de polioles alifáticos. El diisocianato de tolueno (TDI) es el isocianato más utilizado para la fabricación de espumas de poliuretano flexibles. Los polioles son usualmente poliéteres preparados por la adición de óxido de 1,2-propileno y óxido de etileno a polialcoholes o poliaminas. Las espumas de poliuretano pueden dividirse en dos grandes grupos: espumas flexibles y espumas rígidas. Para los efectos de este estudio nos enfocaremos en las espumas de poliuretano flexibles (*Driver*, 1991).

Para la fabricación de las espumas flexibles tradicionales se utilizan polioles cuya masa molecular varía entre 3000 y 6000, los cuales son preparados a partir de la adición del óxido de propileno al glicerol.

Las espumas flexibles son formadas por dos procesos simultáneos: un proceso de polimerización y un proceso de expansión. El gas responsable del proceso de expansión es principalmente el dióxido de carbono producido por la reacción entre el isocianato y el agua. La concentración de isocianato se calcula entre un 90-120% de la cantidad teórica requerida para reaccionar con los grupos hidroxilo del agua. Este porcentaje es también conocido como índice de isocianato. El dióxido de carbono es un excelente agente expansivo, pero se difunde desde las celdas ya formadas y cerradas más rápidamente de la velocidad con la cual es reemplazado por el nitrógeno y el oxígeno presentes en el aire. Para prevenir la contracción de las espumas, las celdas deben abrirse para permitir la penetración del aire.

Gran parte de la aceptación comercial de las espumas de poliuretano puede ser atribuida a los catalizadores que permiten efectuar un control preciso tanto del proceso de polimerización como del proceso de expansión. Este control es esencial para la fabricación de espumas flexibles. Un desequilibrio entre la polimerización y la expansión de la espuma puede provocar imperfecciones serias, el colapso de la espuma y las celdas pueden abrirse prematuramente o no abrirse del todo.

La maquinaria empleada para la preparación de las espumas de poliuretano puede parecer muy complejas, pero todas ellas están basadas en una serie de elementos y principios simples que a continuación se mencionan.

Tanques de alimentación. Los isocianatos, polioles y otros componentes son suministrados desde tanques de alimentación que presentan una gran variedad de tamaños, dependiendo de la aplicación. Dichos tanques usualmente están equipados con agitadores que permiten mantener una dispersión uniforme de los ingredientes. La mayoría de los tanques son presurizados con aire seco o nitrógeno. Al menos se requieren dos tanques para la fabricación de espumas: uno de ellos alimenta el isocianato en uso y el otro alimenta el poliol con el catalizador y otros componentes menores. En algunos casos es necesario adicionar por separado alguno o algunos de los componentes menores, por lo que es necesario el uso de un mayor número de tanques de alimentación.

Bombas de alimentación. Los materiales son suministrados desde los tanques mediante bombas de alimentación seleccionadas cuidadosamente por su gran precisión volumétrica.

Controles de temperatura. Tanto la viscosidad como la densidad de las materias primas líquidas varían con la temperatura. Por lo tanto el control de la temperatura es muy importante para asegurar que las bombas de alimentación suministren de manera constante y controlada cada uno de los componentes. La temperatura es controlada en los tanques de alimentación y/o mediante intercambiadores de calor en línea.

Mezcladores. Todos los componentes necesarios para la fabricación de la espuma son alimentados con una velocidad y en proporciones constantes a un mezclador. Los mezcladores empleados varían en tamaño y forma, pero todos ellos permiten mezclar a alta presión todos los componentes de la formulación.

Dispositivos de formación. La sección de formación es la parte más importante de una máquina de fabricación de espumas de poliuretano. La velocidad de alimentación de la mezcla de materiales debe ser lo suficientemente alta como para permitir que se llene el espacio deseado antes de que la viscosidad del material se vuelva muy alta o antes de que el material gelifique. Por otro lado, el calor generado por la reacción de formación de la espuma debe ser controlado.

Producción continua en bloques o en forma de planchas. Los materiales mezclados son distribuidos mediante una línea de transporte de flujo descendente. La mezcla líquida fluye y es transportada de manera descendente hasta que comienza la formación de la espuma. El proceso de expansión permite el balance del flujo, formándose un frente estacionario de espuma, el cual aumenta hasta que el proceso de expansión finaliza y con ello se forma un bloque continuo de espuma. Los bloques así producidos son después cortados en bloques más pequeños de tamaños apropiados para poder ser sometidos al proceso de curación.

Las espumas utilizadas para la fabricación de cojines son producidas usualmente en forma de planchas. Las máquinas utilizadas en este caso están equipadas con una cubierta superior niveladora que permite la producción de secciones rectangulares de espuma, en lugar de las secciones cuadradas tradicionales. El bloque rectangular puede entonces ser cortado de manera más eficiente en bloques más pequeños o en forma de pequeñas planchas.

Moldeo. La mezcla de materiales para la producción de espuma de poliuretano puede ser cuantificada con precisión para alimentarla en moldes con la forma deseada. Una vez sellado el molde, la mezcla reacciona y el proceso de expansión permite que la espuma llene el molde, formando, por ejemplo, el cojín del respaldo del asiento de un auto.

Las propiedades de las espumas flexibles de poliuretano varían dependiendo de la formulación y de su densidad. Las espumas de poliéter estándar producidas en forma de plancha tienen densidades entre 16-24 kg/m³; las espumas moldeadas producidas con formulaciones similares presentan densidades más altas, entre 30-40 kg/m³.

Las espumas de alta elasticidad (HR por sus siglas en inglés) son preparadas a partir de poliéteres de poliols reactivos que poseen al menos un 50% de grupos hidroxilo primarios. Los grupos hidroxilo primarios de estas formulaciones reaccionan más rápidamente que los grupos hidroxilo secundarios de los poliéteres utilizados en la fabricación de espumas convencionales. En el Anexo 2 de esta tesis se presenta mayor información con respecto a la parte química de la obtención de espumas de poliuretano.

2.0 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivos:

1. Aplicar las herramientas de calidad y el análisis estadístico de procesos para identificar los factores que influyen sobre la dureza y otros parámetros referentes al control de la calidad de las espumas de poliuretano destinadas para su uso final en la Industria Automotriz.
2. Proponer acciones correctivas orientadas a la obtención de un producto final que presente una variación controlada y dentro de especificaciones para la característica de dureza y de los parámetros asociados al proceso de producción.
3. Aplicar la técnica de análisis de variancia para determinar la significancia de los efectos de los factores estudiados.

Hipótesis:

1. La aplicación combinada de herramientas de calidad y del análisis estadístico de procesos, permiten encontrar las causas raíz que originan una considerable dispersión en los valores de dureza final del producto en estudio.
2. Las condiciones hidrotérmicas bajo las cuales se realizan las mediciones de dureza influyen en la dispersión de los valores de dicha característica en el producto final.
3. En el proceso de fabricación existen factores tales como la temperatura del molde, el molde utilizado, el número de ciclos de prensado, entre otros, que influyen también en la dispersión de los valores de dureza en el producto final.

3.0 METODOLOGÍA

Metodología:

Diagramas de Flujo.

Los diagramas de flujo son técnicas analíticas que se usan para visualizar etapas, eventos y operaciones que constituyen un proceso o sistema, a través de una descripción gráfica. Nos ayuda también a examinar como se relacionan los pasos de un proceso, unos con otros; identificando la trayectoria actual e ideal que sigue un producto o servicio con el fin de detectar desviaciones.

La mayoría de los líderes de equipos de mejora coinciden en que esta herramienta representa el centro de la mejora continua y la reingeniería de los procesos, ya que a través de esta herramienta los procesos cobran vida a los ojos de los colaboradores.

Sin embargo no se cuenta con datos precisos sobre el origen de esta herramienta, solo podemos afirmar que fueron popularizadas en el ambiente de negocios por los programadores de computadoras, en las décadas de los 60's y 70's.

Son utilizados por los analistas de sistemas que tienen que examinar la lógica de complejos paquetes de software, permitiéndoles, el ahorro de tiempo y dinero, describiendo y evaluando la lógica de un sistema en papel.

Además de utilizarse para identificar los problemas de un proceso llamado imaginación constructiva. (Martínez, 1998)

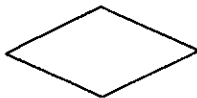
El diagrama de flujo, utiliza símbolos fáciles de reconocer para representar el tipo de operación realizada. Los siguientes símbolos son los más utilizados:



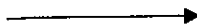
Símbolo **INICIO/FIN**, se utiliza una elipse que identifica el inicio y el final del proceso.



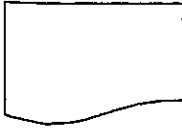
Símbolo de **actividades**, se utiliza un rectángulo que indica un solo paso dentro del proceso.



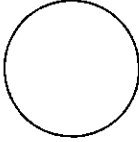
El símbolo de **decisión** es representado por un diamante.



Las **líneas de flujo** se utilizan para representar la dirección del flujo del proceso.



El símbolo **documento** representa la información escrita perteneciente al proceso.



El símbolo **conector** es un círculo usado para indicar la continuación del flujo del proceso.

Esta herramienta puede ser utilizada en cualquier área. *(Brassard, 1998)*

Las personas que cuenten con mayor conocimiento de un proceso deberán:

1. Definir los pasos del proceso por medio de una tormenta de ideas o formar un documento de referencia.
2. Trazar un diagrama de flujo del proceso, indicando los pasos que éste sigue actualmente.
3. Trazar un diagrama de flujo del proceso, indicando los pasos que el mismo debiera seguir si todo trabaja correctamente.
4. Evaluar los pasos para su integridad, eficiencia y comparar los diagramas para encontrar las diferencias, ya que ahí es donde radica el problema. *(Russet, 1998)*

La construcción de un diagrama de flujo proporciona a los equipos de mejora un claro entendimiento del proceso como un todo, descubriendo problemas, cuellos de botella en el sistema, pasos innecesarios y reprocesamientos.

Los diagramas de flujo, permiten al equipo de mejora:

- Visualizar el proceso de inicio a fin.
- Simplificar la solución del problema.
- Dar una estructura simple de un proceso complejo.
- Ayudar a descubrir problemas que pasan desapercibidos.
- Facilita la reducción de tiempos del ciclo de inventarios en proceso.
- Ayuda a enfocar los esfuerzos del equipo de mejora, en los hechos y resultados y no en responsabilidades.
- Permiten estimular la comunicación directa y abierta.
- Evaluar la capacidad del proceso contra los requerimientos de los clientes.

- Facilita la documentación de cualquier proceso o sistema. *(Martínez, 1998)*

Algunos consejos para la elaboración de los diagramas de flujo son:

- Definir claramente los límites del proceso.
- Utilizar los símbolos ya descritos.
- Asegurarse de que cada paso tenga una salida.
- Por lo general sale una flecha de los bloques; de no ser así, podría requerirse el uso de un bloque de decisión. *(Brassard; 1998)*

Lluvia de ideas.

Los métodos gráficos nos auxilian a pensar mejor, enfocando la atención en la verdadera dimensión del problema. Sin embargo reviste gran importancia expandir el pensamiento para incluir todas las dimensiones de un problema e incluso una solución.

Esta herramienta es usada para ayudar a un grupo a crear tantas ideas como sea posible en el menor tiempo. Es posible llevar a cabo la lluvia de ideas de la siguiente manera:

- **Estructurada:** en la cual cada persona en el grupo, debe dar alguna idea conforme le toca el turno de participar; en el caso de no aportar alguna deberá esperar su turno en la siguiente vuelta. Este sistema "obliga" a participar a las personas tímidas, creando una cierta presión a contribuir.
- **Sin estructurar:** en este método, los miembros del grupo aportan ideas tan pronto como les vienen a la mente, de manera espontáneas, creando una atmósfera relajada; sin embargo, se corre el riesgo de que solamente participen las personas más extrovertidas.

Las reglas que se aplican al llevar acabo la lluvia de ideas, son las siguientes:

- Nunca criticar las ideas.
- Escribir cada idea en un rotafolio o pizarrón, de tal forma que sea visible a todos, lo cual evita malos entendidos y crea nuevas ideas.
- Todos deben estar de acuerdo a la pregunta o asunto que se está tratando.
- Anotar las palabras al pie de la letra, evitando modificar o interpretar la idea original a su manera.
- Ser breve (de cinco a quince minutos). *(Brassard; 1998)*

Diagrama de causa y efecto.

En 1935, Kaoru Ishikawa (*Kume, 1996*) resumió la opinión de los ingenieros de un planta, ilustrándola en forma de un esqueleto de pescado, mientras se discutía un problema de calidad.

Esta, es una de las primeras evidencias que se tiene de este enfoque. De tal manera que al usar este diagrama en la práctica, resultó ser muy útil y su uso se extendió gradualmente. Así

esta herramienta de calidad, figuró dentro de los estándares industriales japoneses (JIS), de control de calidad.

En donde el diagrama de causa y efecto se definió como el diagrama que muestra la relación entre una característica de calidad y sus factores.

Es conocido también como diagrama espina de pescado, por la semejanza con el esqueleto de un pescado, ocasionalmente se le conoce también como diagrama de "árbol" o de "río". (Kume; 1996)

Este diagrama fue desarrollado para representar la relación entre algún efecto y todas las posibles causas que lo influyen. Se coloca al lado derecho del diagrama, el efecto o problema y las influencias o causas principales son listadas a la izquierda, se recomienda comenzar a seleccionar un problema que sea controlable dentro del área de trabajo.

Estas herramientas de calidad son empleadas para ilustrar claramente las diferentes causas que afectan un problema, identificándolas y relacionándolas unas con otras. Para cada efecto surgirán varias categorías de causas principales, las cuales pueden ser resumidas en las siguientes cuatro categorías: personal, maquinaria, métodos y materiales; es muy importante tener en cuenta que las categorías son sólo las mínimas sugeridas, conocidas como las cuatro "M's".

De tal manera que un diagrama de causa y efecto bien detallado, tomará la forma de un esqueleto de pescado.

A partir de esta bien definida lista de posibles causas, las más comunes son identificadas y seleccionadas para un análisis más detallado; y a medida que examine cada causa, es muy importante ubicar todo lo que ha cambiado, así como de las desviaciones de los patrones. Hay que tomar en cuenta, que lo que se necesita es "curar" y eliminar las causas, no abordando los síntomas del problema.

Elaborar diagramas de causa y efecto que sean útiles, no es una tarea fácil. Quienes tienen éxito en la solución de problemas de control de calidad, son sólo aquellos que logran crear un diagrama de causa y efecto útil.

Existen diversas maneras de elaborar diagramas de causa y efecto, a continuación se describen dos casos típicos:

Diagrama de causa y efecto para la identificación de causas:

- a) Describir el efecto o atributo de calidad.
- b) La característica de calidad la colocamos al lado derecho sobre una hoja de papel, encerrándola en un cuadro; dibujamos de izquierda a derecha, la espina dorsal del pescado. Escribimos las causas primarias (huesos largos) que consideramos que dan pie a esa determinada característica de calidad, encerrándolas también en cuadros.
- c) Escribimos las causas secundarias (huesos medianos) que afectan a las primarias (huesos largos) y si es necesario, es muy conveniente anotar también las causas terciarias (huesos pequeños).
- d) Es muy importante marcar los factores particularmente importantes que parecen tener efecto significativo sobre la característica de calidad.
- e) Registrar toda la información que pueda ser útil, como el nombre del producto, el proceso, la lista de participantes, la fecha, etc.

Si los datos nos muestran que existe variación, es preciso saber por que existe. El saber que relación existe entre las causas primarias y secundarias, y a su vez las secundarias con las terciarias nos conduce por "buen camino". Así, con este tipo de reflexión nos es posible construir un diagrama de causa y efecto con bases racionales y sólidas.

El siguiente paso es asignar la importancia a cada factor, ya que todos los factores del diagrama no se relacionan necesariamente en forma estrecha con el efecto o característica de calidad.

Pasos para la elaboración de diagramas de causa y efecto a partir de listas sistemáticas de causas.

- a) Seleccionar la característica de calidad.
- b) Buscar todas las causas posibles que afecten la característica de calidad.
- c) Agrupar todas las causas por su afinidad, conectando aquellos elementos que parecen tener un efecto significativo sobre la característica de calidad o efecto.
- d) Asignar la importancia a cada factor, marcando aquellos que son muy importantes.
- e) Anotar toda la información que pueda sernos de utilidad.

Este es otro enfoque, en el que se pone de manifiesto, la relación que existe entre dos actividades diferentes, la primera consiste en percibir todas las posibles causas y la segunda establece una agrupación sistemática.

La manera de agrupar las causas de una manera sistemática se hace partiendo de los huesos pequeños, pasando por los medianos hasta los grandes.

Interpretación.

Con la finalidad de encontrar las causas fundamentales del problema, debemos considerar la siguiente información:

- Observar las causas que aparecen con más frecuencia.
- Llegar al consenso del grupo.
- Reunir la información necesaria para determinar las frecuencias relativas de las diversas causas.
- Ser conciso.
- Todos deben estar de acuerdo con la parte descriptiva del problema.

Existen otros tipos de diagramas de causa y efecto, los cuales se clasifican de acuerdo a las siguientes estrategias:

- La primera estrategia consiste en clasificar de manera secuencial todos los pasos de un proceso, en donde las mismas preguntas son aplicadas a cada categoría de causas.
- La segunda estrategia consiste en enumerar las posibles causas, las cuales se organizan en categorías de causas principales.

- Es muy importante tratar de mejorar continuamente el diagrama de causa y efecto; el uso de este diagrama nos ayuda a identificar las partes que deben ser verificadas, omitidas o modificadas, así como descubrir las partes que deben agregarse.

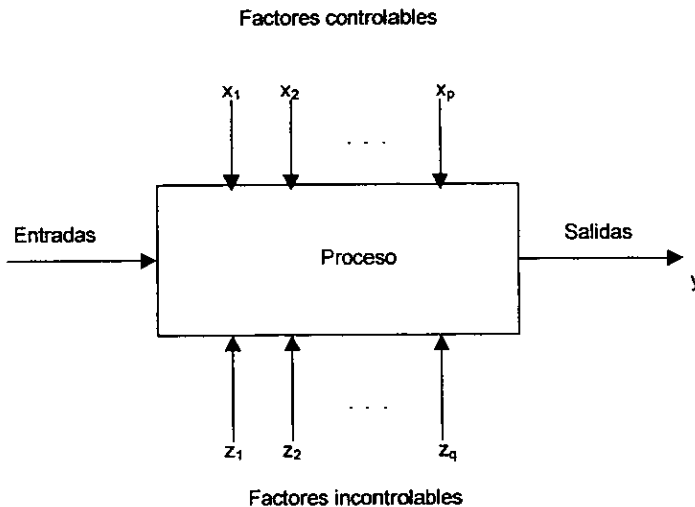
La estrategia utilizada en esta tesis, para la elaboración del diagrama de causa y efecto fue la segunda, la cual me permitió agrupar cada una de las causas en categorías de causas principales. Ver Anexo 1.

Por tanto la solución de problemas finalmente no se logra sólo con buenos deseos o con la aplicación de una sola herramienta de calidad; para la solución de problemas deben usarse varios métodos conjuntamente.

Diseño experimental.

Los investigadores realizan experimentos virtualmente en todos los campos del saber, por lo general para descubrir algo acerca de un proceso o sistema en particular. Literalmente, un experimento es una prueba o ensayo. Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

El proceso o sistema bajo estudio puede presentarse por medio del siguiente modelo:



Suele ser posible visualizar el proceso como una combinación de máquinas, métodos, personas y otros recursos que transforman alguna entrada (a menudo un material) en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas de las variables del proceso x_1, x_2, \dots, x_p son controlables, mientras que otras z_1, z_2, \dots, z_q son incontrolables (aunque pueden ser controlables para los fines de una prueba). Entre los objetivos del experimento pueden incluirse:

1. Determinar cuáles variables tienen mayor influencia en la respuesta, y .

2. Determinar el valor de las x que influyen en y , de modo que y tenga casi siempre un valor cercano al valor nominal deseado.
3. Determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que la variabilidad de y sea pequeña.
4. Determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que se minimicen los efectos de las variables incontrolables z_1, z_2, \dots, z_q .

Los métodos de diseño experimental tienen un cometido importante en el desarrollo de procesos y en la depuración de procesos para mejorar el rendimiento. En muchos casos, el objetivo puede ser desarrollar un proceso consistente o robusto; esto es, un proceso afectado mínimamente por fuentes de variabilidad externas (las z).

En cualquier experimento, los resultados y conclusiones que puedan obtenerse dependen, en gran parte, de la forma en que los datos fueron recopilados.

Aplicaciones del Diseño Experimental. (Montgomery, 1991 y Johnson, 1990)

Los métodos de diseño experimental tienen amplia aplicación en muchas disciplinas. En efecto es posible considerar a la experimentación como parte del proceso científico y una de las formas, en que aprendemos acerca de la forma en que funcionan los sistemas o procesos. Por lo general este aprendizaje se da a través de una serie de actividades en las cuales hacemos conjeturas acerca de un proceso, realizamos experimentos para generar datos a partir del proceso, y entonces usamos la información del experimento para establecer nuevas conjeturas, que llevan a realizar nuevos experimentos, y así sucesivamente.

El diseño experimental es un medio de importancia crítica en el medio de la ingeniería para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura. También se emplea extensamente en el desarrollo de nuevos procesos. La aplicación de técnicas de diseño experimental en una fase temprana del desarrollo de un proceso puede dar por resultado:

1. Mejora en el rendimiento del proceso.
2. Menor variabilidad y mayor apego a los requerimientos nominales.
3. Menor tiempo de desarrollo.
4. Menores costos globales.

Los métodos de diseño experimental también tienen un cometido importante en las actividades de diseño técnico (o diseño de ingeniería), en las cuales se desarrollan nuevos productos y se mejoran otros ya existentes. Algunas aplicaciones del diseño experimental en el diseño técnico son:

1. Evaluación y comparación de configuraciones de diseño básicas.
2. Evaluación de materiales alternativos.
3. Selección de parámetros de diseño de modo que el producto funcione bien en una amplia variedad de condiciones de campo (de uso real); esto es, de modo que el producto sea consistente (robusto).

El uso del diseño experimental en estas áreas puede dar por resultado productos con mayor confiabilidad y mejor funcionamiento en el campo, menores costos, y menor tiempo de diseño y desarrollo del producto.

Principios básicos.

Para que un experimento se realice en la forma más eficiente, es necesario emplear métodos científicos en su planeación. El diseño estadístico de experimentos, es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados, que pueden ser analizados mediante métodos estadísticos, con objeto de producir conclusiones válidas y objetivas. Se requiere de un enfoque estadístico del diseño de experimentos para obtener conclusiones significativas a partir de los datos. La metodología estadística es el único enfoque objetivo para analizar un problema que involucre datos sujetos a errores experimentales. Así que hay dos aspectos en cualquier problema experimental: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos. Estos dos temas están estrechamente relacionados, ya que el método de análisis depende directamente del diseño empleado.

Los tres principios básicos en el diseño de experimentación (*Montgomery, 1991*), son el de obtención de réplicas, la aleatorización (proceso por el cual se reduce el efecto de variables no controladas en la ejecución del experimento) y el análisis por bloques. La obtención de réplicas se refiere a repeticiones del experimento básico. Este concepto tiene dos propiedades importantes. En primer lugar permite al experimentador obtener estimación del error experimental, la cual constituye la unidad básica de medida para determinar la significancia estadística de los efectos de los factores investigados. En segundo lugar, si la media muestral (\bar{U}) es usada para estimar la media de un factor, entonces la replicación permite obtener una estimación más precisa de los efectos de los factores.

La aleatorización es la piedra angular que fundamenta el uso de los métodos estadísticos en el diseño de experimentos. Se entiende por aleatorización el hecho de que tanto la asignación del material experimental como del orden en que se realizan las pruebas individuales se determinan al azar. Los métodos estadísticos requieren que las observaciones sean variables aleatorias independientes. Además, la aleatorización permite eliminar o al menos minimizar los efectos de factores extraños que pudieran estar presentes.

El análisis por bloques es una técnica que se usa para incrementar la precisión del experimento. Un bloque es una porción del material experimental que es más homogéneo que el total del material. Al realizarse un análisis por bloques se hacen comparaciones entre las condiciones de interés del experimento dentro de cada bloque.

Directrices para el diseño de experimentos.

Para usar un enfoque estadístico al diseñar y analizar un experimento se requiere que todos los participantes en él tengan de antemano una idea clara de qué es exactamente lo que se va a estudiar, cómo se van a recopilar los datos y, al menos, una idea cualitativa de cómo se van a analizar. A continuación se presenta una guía del procedimiento recomendado:

1. *Comprensión y planteamiento del problema.* Es necesario desarrollar todas las ideas sobre los objetivos del experimento, por lo que es recomendable solicitar la opinión de todas las partes involucradas.
2. *Elección de factores y niveles.* El experimentador debe elegir los factores que variarán en el experimento, los intervalos de dicha variación y los niveles específicos a los cuales se hará el experimento. También debe considerarse la forma en que se controlarán estos factores para mantenerlos en los valores deseados, y cómo se les medirá.
3. *Selección de la variable de respuesta.* Al seleccionar la respuesta o variable dependiente, el experimentador debe estar seguro de que la respuesta que se va a

medir realmente proporcione información útil acerca del proceso en estudio. Con mayor frecuencia, el promedio o la desviación estándar de la característica medida serán la variable de respuesta. La capacidad de medición también es un factor importante.

4. *Elección del diseño experimental.* Para elegir el diseño adecuado es necesario considerar el tamaño de la muestra (número de réplicas), seleccionar un orden adecuado para los ensayos experimentales, y determinar si hay implicado algún bloqueo u otras restricciones de aleatorización. También es importante tener presente los objetivos experimentales.
5. *Realización del experimento.* Cuando se realiza el experimento, es vital vigilar el proceso cuidadosamente para asegurar que todo se realice de acuerdo a lo planeado. En esta fase, los errores suelen anular la validez experimental.
6. *Análisis de datos.* Deben emplearse métodos estadísticos para analizar los datos, de modo que los resultados y conclusiones sean objetivos más que apreciativos. Existen muchos excelentes paquetes de software para el análisis de datos y varios métodos gráficos sencillos son importantes en la interpretación de los datos.
7. *Conclusiones y recomendaciones.* Una vez que se han analizado los datos, el experimentador debe extraer conclusiones prácticas de los resultados y recomendar un curso de acción. En esta fase a menudo son útiles los métodos gráficos, en especial al presentar los resultados a otras personas.

En el Anexo 3 incluido en el presente trabajo se presenta un ejemplo de la aplicación del diseño de experimentos y los cálculos involucrados.

Determinación de dureza en espumas de poliuretano. (Driver, 1991)

Los métodos de ensayo son una parte importante del desarrollo de materiales y del control de calidad de los mismos. Su objetivo consiste en obtener datos con respecto a una propiedad, bajo condiciones controladas y evitando en lo posible la influencia de factores extraños a la medición. Muy pocas veces es posible eliminar todos estos factores, pero casi siempre pueden reducirse a un nivel de poca significación estadística.

Varias organizaciones han desarrollado métodos de ensayo estandarizados que puede reproducirse y adaptarse en cualquier laboratorio. La *American Society of Testing and Materials (ASTM)* ha establecido y desarrollado un gran número de estos métodos (Driver, 1991).

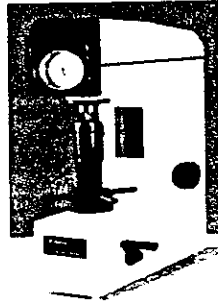
Las propiedades que pueden ser evaluadas en materiales como las espumas de poliuretano son diversas dependiendo del uso final de las mismas. Entre dichas propiedades podemos mencionar la elasticidad, la compresión, la resistencia a fuerzas cortantes, la dureza, la conductividad térmica, entre otras. En este anexo nos referiremos a la evaluación de la dureza.

Las pruebas de dureza pueden ser de diversos tipos. Cada uno de ellos está relacionado con otras propiedades del material evaluado. Así, las pruebas de dureza puede ser clasificadas en tres tipos:

1. Pruebas de dureza que miden la resistencia de un material a la indentación producida por un dispositivo indentador. Ejemplos de este tipo de ensayo son: la prueba de dureza de Brinell, el indentador de Vickers, el indentador de Knoop, la prueba de dureza de Barcol, el durómetro Shore y el durómetro ISO.
2. Pruebas de dureza que miden la resistencia de un material a la abrasión ocasionada por otro material. Ejemplos de este tipo de ensayo son: la prueba de dureza de Bierbaum y la prueba de dureza de Moh.

3. Pruebas de dureza que evalúan la elasticidad del material. Ejemplos de este tipo de ensayo son las diferentes pruebas de dureza de Rockwell que son descritas en el procedimiento ASTM D785 (Driver, 1991). Este tipo de pruebas son las más adecuadas para la evaluación de espumas de poliuretano, por lo que a continuación se describe con más detalle la prueba de dureza de Rockwell.

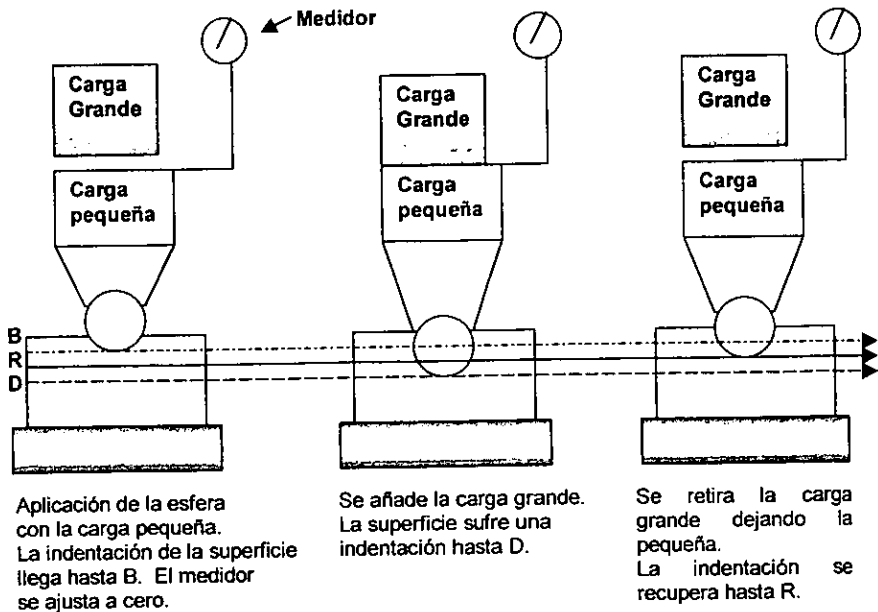
Para la prueba de dureza de Rockwell se utilizan muestras de prueba de cuando menos 1/4 de pulgada de espesor (0.6 cm). En la siguiente figura se ilustra un instrumento INSTRON empleado para la medición de la dureza de Rockwell:



Medidor de dureza INSTRON.

En el siguiente esquema se presenta de manera gráfica la prueba de Rockwell:

Prueba de dureza de Rockwell



La distancia RB constituye el valor de la dureza Rockwell que se lee directamente en el medidor.

Básicamente, la prueba de Rocwell se lleva a cabo de acuerdo al siguiente procedimiento:

- a) El primer paso consiste en seleccionar las piezas de prueba y se trasladan al cuarto en donde se va a efectuar la medición, para que dichas piezas se adapten a las condiciones ambientales del cuarto. Dependiendo del procedimiento en particular, el tiempo de ambientación de las piezas de prueba puede variar, pero se recomiendan 24 horas de ambientación.
- b) La o las piezas de prueba que se van a medir se colocan entre la horma fija del instrumento de medición y la parte móvil con la que se aplicará la carga.
- c) Se verifica que el instrumento se encuentre ajustado a una lectura cero y una vez comprobado lo anterior se acciona el instrumento.
- d) Una vez accionado el instrumento, éste automáticamente inicia la aplicación de la carga mas pequeña mediante una esfera, la cual produce una cierta indentación hasta un nivel al que llamaremos B. Después, el medidor del instrumento se ajusta a cero, y la carga pequeña aplicada se mantiene.
- e) Enseguida se aplica la carga mayor, lo que produce un incremento en la indentación, la cual llega a un nuevo nivel al que llamaremos D. En este caso ya no se ajusta el medidor del instrumento a cero.
- f) Luego, la carga mayor es retirada mientras se mantiene la carga pequeña, lo que produce un nuevo nivel de indentación al que llamaremos R. Es justamente la distancia entre los niveles de indentación R y B los que determinan el valor de la lectura obtenida en el instrumento y corresponde al valor de dureza de la prueba de Rocwell.
- g) Finalmente, se retira la carga pequeña, se ajusta el medidor del instrumento a una lectura cero y se retira la muestra de prueba.

4.0 PRIMERA PARTE: DISPERSIÓN DE LA MEDICIÓN

Primera Parte: Dispersión de la Medición

4.0.- Dispersión debida a la medición.

En la función de Aseguramiento de la Calidad, la precisión en las mediciones es un elemento importante que permite sustentar adecuadamente la toma de decisiones. Dentro del concepto anterior se encuentran involucradas herramientas estadísticas tales como: Control Estadístico de Procesos, Diseño de experimentos, Análisis de variancia, entre otros.

Si las mediciones no son realizadas correctamente las consecuencias pueden ser diversas: productos fuera de especificaciones, retrasos en el proceso de fabricación, deterioro en la imagen de la empresa, etc.

Para evitar lo anterior es importante que la empresa cuente con un sistema de medición confiable que le permita obtener datos precisos.

Por otro lado también es importante que todos los instrumentos utilizados para efectuar las mediciones respectivas se encuentren debidamente calibrados y contemplados en un programa regular de calibración y mantenimiento.

Sin embargo, la calibración y mantenimiento sistemáticos de los instrumentos de medición no son suficientes para garantizar su capacidad de medición. Esto quiere decir que aún cuando el instrumento se calibre regularmente, puede que éste no satisfaga las especificaciones requeridas, considerando el método de medición y el entorno.

Por ello, fue necesario en primera instancia llevar a cabo un estudio de la capacidad del instrumento denominado INSTRON para la medición de la dureza de la espuma polimérica HR, así como también la influencia de factores hidrotérmicos que afectan a la medición.

4.0.1 Estudio de la capacidad del instrumento INSTRON.

Este estudio consistió en la evaluación de la variación en las mediciones de dureza de los cojines moldeados realizadas con la máquina INSTRON. Cada método de medición empleado está determinado por el cliente de acuerdo a un procedimiento de ensayo descrito en un pliego petitorio. En la Metodología se explica un método general para la determinación de la dureza en polímeros.

El principio general de la medición de la dureza consiste en aplicar una carga creciente sobre el cojín moldeado que está siendo evaluado. Para ello se coloca dicho cojín entre un soporte rígido y una horma móvil de ensayo, y se mide la longitud del hundimiento experimentado por la espuma bajo la horma móvil, lo cual depende evidentemente de la fuerza aplicada; también se mide la altura bajo el peso de la horma de prueba correspondiente a la carga aplicada.

Para este estudio se tomaron como referencia dos cojines moldeados:

- CAV J64 (Utilizado en el asiento delantero de la Renault Megane Scénic)
- CAV 948 (Utilizado en el asiento delantero PSA del Peugeot Citroën)

La dureza de los cojines mencionados es evaluada respectivamente por los métodos de ensayo Renault 32-05-818 y el PSA Peugeot Citroën D41 1427.

4.0.1.1 Técnicas Experimentales.

Se utilizaron tres piezas (P1, P2 y P3) de cada referencia para efectuar este estudio. A cada pieza se le efectuaron diez determinaciones de dureza con ayuda de la máquina INSTRON, permitiendo un tiempo de relajación de ocho horas entre cada dos mediciones. Para poder determinar la repetibilidad y la reproducibilidad de la medición, la dureza de las piezas P1 y P2 fue medida por dos operadores diferentes, y la pieza P3 fue medida alternativamente por los dos operadores. Es importante señalar que antes de cada medición las piezas fueron sometidas a una ambientación en una estufa húmeda bajo las siguientes condiciones: $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura y una humedad relativa del $50\% \pm 5\%$.

4.0.1.2 Resultados y discusión.

Los resultados de las mediciones de la dureza de las piezas de prueba, expresados como el hundimiento experimentado por dichas piezas E y como la altura de cada pieza bajo la carga aplicada HSP, se encuentran consignados en las Tablas 1 y 2 para los cojines CAV J64 y CAV 948 sucesivamente. Las representaciones gráficas de las dispersiones se encuentran reportadas en las Figuras 1 y 2, y en ellas no se observa ningún comportamiento anómalo ni indicación alguna de que el operador que efectúa las mediciones sea un factor que influya significativamente en el proceso. En la Tabla 1 se encuentran los valores promedio para los cojines CAV J64 (indicados en milímetros) obtenidos de las diez mediciones efectuadas para cada pieza, tanto para la determinación del hundimiento (E) como para la determinación de la altura bajo la carga aplicada (HSP). En cada caso también se calculó la desviación estándar correspondiente, la capacidad de medición y el porcentaje de variación. Para los cálculos de la capacidad de medición y el porcentaje de variación se consideró una tolerancia de 6 mm. De esta forma, por ejemplo para el caso de la pieza P1 se obtuvo un valor medio de hundimiento (E) de 32.07 mm, una desviación estándar de 0.24 mm, una capacidad de medición (Cm) de 4.16 y un porcentaje de variación de 4%. La capacidad de medición se calculó con la fórmula siguiente:

$$C_m = (\text{Tolerancia}) / (6 * \text{Desviación Estándar})$$

donde,

Cm : Capacidad de medición

Tolerancia: 6mm

Como podemos notar en la fórmula anterior, entre menor sea el valor de la desviación estándar obtendremos una capacidad de medición mayor, lo que nos indica que el proceso se encuentra controlado y con niveles mínimos de variación. Por otro lado, el porcentaje de variación reportado es el resultado de dividir la desviación estándar para cada caso entre el valor de la tolerancia; por ejemplo, para las mediciones del hundimiento de la pieza P1 se obtuvo una desviación estándar de 0.24 mm, la cual representa el 4% del valor de la tolerancia de trabajo. Para cada uno de los casos reportados en la Tabla 1 se procedió de la forma descrita.

En la Tabla 2 se reportaron los valores promedio para los cojines CAV 948 (indicados en milímetros) obtenidos de las diez mediciones efectuadas para cada pieza, a cada una de las condiciones de fuerza aplicada. Nótese que en este caso cada pieza fue analizada a fuerzas aplicadas de 300 N, 500 N y 750 N. También se reportan los valores de la desviación estándar, la capacidad de medición y el porcentaje de variación, los cuales fueron calculados de manera similar a los valores reportados en la Tabla 1. Sin embargo, en este caso el valor de la tolerancia fue de 5 mm para el caso de las mediciones efectuadas a 300 N y de 4 mm para las mediciones realizadas a 500 N y 750 N.

El análisis de los resultados muestra que el instrumento de medición INSTRON presenta una buena capacidad de medición de los hundimientos (E) por una parte, ya que se obtuvo un valor promedio de 3.87 para dicho parámetro. Sin embargo, obtuvimos una menor capacidad de

medición de la altura bajo la carga aplicada (HSP), ya que para el caso del cojín CAV J64 obtuvimos un valor promedio de 1.85 y para el caso del cojín CAV 948 el valor promedio es de 1.6. Por otra parte cabe señalar que la variación en la medición de HSP es mas importante que la correspondiente a la medición de E. Este comportamiento se observó en todas las piezas analizadas. Recordemos que el grupo PSA exige en la norma del cliente que la dureza sea expresada bajo la forma de altura bajo la carga aplicada (HSP).

TABLA NO. 1: CAPACIDAD DE LA MEDICIÓN DE LA DUREZA DEL COJÍN CAV J64

n = 10	P1		P2		P3	
	E _{300, mm}	HSP _{300, mm}	E _{300, mm}	HSP _{300, mm}	E _{300, mm}	HSP _{300, mm}
Media	32.07	49.98	33.22	48.54	32.36	48.76
Desviación Estándar	0.24	0.51	0.23	0.51	0.32	0.6
Extensión	0.77	2.03	0.63	2.08	1.07	1.78
Capacidad Cm	4.16	1.96	4.34	1.96	3.12	1.64
Variación %	4	8.5	3.8	8.5	5.3	10

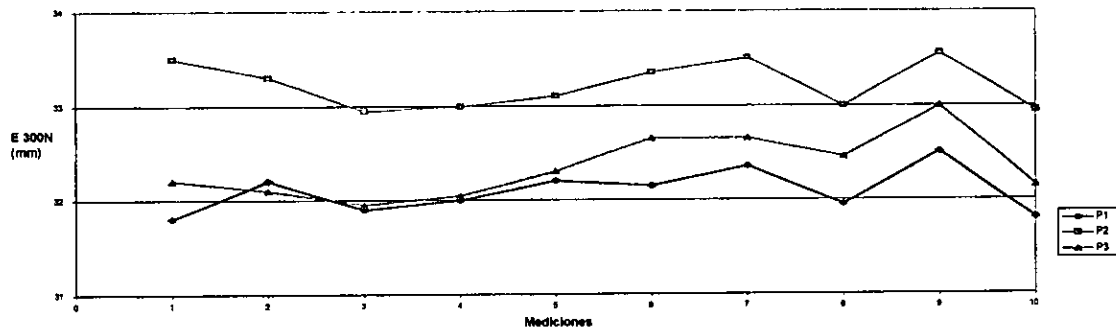
TABLA NO. 2: CAPACIDAD DE LA MEDICIÓN DE LA DUREZA DEL COJÍN CAV 948

n = 10	Altura bajo la carga aplicada (HSP)								
	P1			P2			P3		
	300 N (mm)	500 N (mm)	750 N (mm)	300 N (mm)	500 N (mm)	750 N (mm)	300 N (mm)	500 N (mm)	750 N (mm)
Media	50.83	43.47	37.44	50.25	42.48	36.2	51.39	43.83	37.73
Desviación Estándar	0.34	0.43	0.51	0.48	0.45	0.5	0.43	0.49	0.53
Extensión	0.98	1.35	1.65	1.76	1.51	1.64	1.34	1.53	1.64
Capacidad	2.45	1.55	1.34	1.74	1.48	1.33	1.94	1.36	1.26
Variación %	6.8	10.75	12.75	9.6	11.25	12.5	8.6	12.25	13.25

TABLA NO. 3: CAPACIDAD DE LA MEDICIÓN DE LA DUREZA DEL COJÍN CAV 948 DESPUÉS DEL CAMBIO DEL MODO DE OPERACIÓN

n = 10	Altura bajo la carga aplicada (HSP)								
	P1			P2			P3		
	300 N (mm)	500 N (mm)	750 N (mm)	300 N (mm)	500 N (mm)	750 N (mm)	300 N (mm)	500 N (mm)	750 N (mm)
Media	51.87	44.1	37.87	51.16	43.48	37.48	51.69	43.92	37.77
Desviación Estándar	0.16	0.14	0.14	0.18	0.18	0.14	0.22	0.22	0.17
Extensión	0.62	0.49	0.5	0.71	0.72	0.47	0.74	0.78	0.63
Capacidad	5.11	4.6	4.66	4.6	3.75	4.76	3.84	3.01	3.83
Variación %	3.2	3.5	3.5	3.6	4.5	3.5	4.4	5.5	4.25

Figura 1: Dispersión de la medición de la dureza de CAVJ64



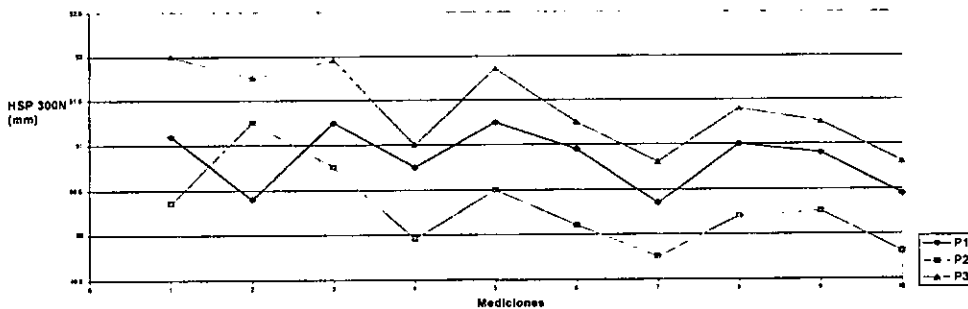
Parámetros	
Media	
Desviación Estándar	
Capacidad	
Variación, %	

	P1	P2	P3
Media	32.07	33.22	32.36
Desviación Estándar	0.24	0.23	0.32
Capacidad	4.16	4.34	3.12
Variación, %	4.0	3.8	5.3

Nominal	31
Tolerancia	±3

Nota: En esta gráfica se expresa la dureza de los cojines como el Hundimiento (E) expresado en milímetros.

Figura 2: Dispersión de las mediciones de Altura Bajo Peso (HSP) a 300N de CAV948



Parámetros	
Media	
Desviación Estándar	
Capacidad	
Variación, %	

	P1	P2	P3
Media	50.83	50.25	51.39
Desviación Estándar	0.34	0.48	0.43
Capacidad	2.45	1.74	1.94
Variación, %	6.8	9.6	8.6

Nominal	48.5
Tolerancia	±2.5

Nota: En este caso se expresa la dureza de los cojines como la Altura Bajo Peso (HSP) expresada en milímetros.

4.0.1.3 Acciones correctivas.

Un análisis de las causas de la variación nos condujo a la realización de un experimento en donde se cambió el modo de operación para la medición de la dureza de los cojines CAV 948. El nuevo modo de operación consistió en automatizar la puesta a "cero" de la horma de ensayo en lugar de hacerlo visualmente como se acostumbraba. Lo anterior permite estandarizar el punto de partida de la horma de ensayo al principio de los ciclos compresión-descompresión. Para lograr lo anterior, el instrumento cuenta con un dispositivo que contiene un sensor que permite localizar la posición relativa de la parte móvil y de la parte fija. La localización cero llamada automática se obtiene posicionando la horma de prueba sobre el cojín sin variar la carga y enseguida se le coloca el cero con la ayuda de una espiga LVDT sobre la pantalla de la computadora que controla al instrumento de medición; entonces la ejecución de los ciclos compresión-descompresión se efectúa desde esta posición.

Los resultados del experimento anterior se encuentran reportados en la Tabla 3, y se calcularon de manera similar a los resultados indicados en la Tabla 2. Como se puede notar en la Tabla 3, al cambiar el modo de operación se mejoró la capacidad de la máquina (Cm) en el proceso de medición al pasar este parámetro de un valor promedio de 1.6 a un valor promedio de 4.24, lo que representa una mejora muy importante en cuanto al proceso de medición en estudio.

4.0.2 Estudio de la influencia de las condiciones hidrotérmicas sobre la medición de la dureza

El objeto de este estudio es estimar los efectos de la humedad relativa y de la temperatura de la sala de pruebas sobre la medición de la dureza.

Para efectuar este estudio se utilizó un diseño de experimentos factorial a dos niveles con dos factores (2^2) y se realizaron tres réplicas de cada uno de los experimentos establecidos por el diseño. Los niveles de cada factor analizado se determinaron de acuerdo a los límites de los intervalos de tolerancia, que son los siguientes: temperatura $23^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$ y humedad relativa $50\% \pm 5\%$. Los niveles de estudio seleccionados se encuentran indicados en la siguiente Tabla y se efectuaron las pruebas en un cuarto especial con temperatura y humedad controladas:

TABLA 4: NIVELES SELECCIONADOS PARA LOS FACTORES EN ESTUDIO

Factor	Nivel Bajo (-1)	Nivel Alto (1)
A: Humedad Relativa, %	45	55
B: Temperatura, °C	21	25

4.0.2.1 Modo de operación.

Se llevaron a cabo dos conjuntos de experimentos, de acuerdo al diseño planteado; uno fue para la medición de la dureza del cojín CAV J64 y el otro fue para el estudio de la pieza CAV 948. En ambos casos los materiales en estudio fueron sometidos a las condiciones establecidas por los diseños experimentales desde 24 horas antes de efectuar las mediciones. Los tiempos de relajación entre dos mediciones fueron de 24 horas para cada caso. En las Tablas 5 y 6 se muestran las matrices de los experimentos, así como los promedios de las respuestas observadas indicados en milímetros. También en este caso las determinaciones para el cojín CAV 948 se realizaron a tres diferentes niveles de fuerza aplicada: 300 N, 500 N y 750 N. Cabe señalar que los resultados se reportan en estas tablas en el orden acostumbrado, pero cada serie de experimentos fue aleatorizada. En estas tablas el nivel bajo de cada factor está representado por (-1) y el nivel alto de cada factor por (1). Por ejemplo en la Tabla 5, el experimento 1 se llevó a cabo en el nivel bajo de humedad relativa (45%) y en el nivel bajo de temperatura (21° C).

Tabla 5: Matriz de experimentos para el cojín CAV J64

No. Control	Orden Aleatorio	Factores		Interacción	Valores de Hundimiento Obtenidos E300N, (mm)			Promedio E300N(mm)
		Humedad	Temperatura		1	2	3	
		A	B	AB				
1	3	-1	-1	1	30.75	30.63	30.75	30.73
2	2	-1	1	-1	31.08	31.34	31.15	31.19
3	4	1	-1	-1	31.76	31.57	31.81	31.71
4	1	1	1	1	31.93	32.15	31.93	32.02

Tabla 6: Matriz de experimentos para el cojín CAV 948

No. Control	Orden Aleatorio	Factores		Interacción	Promedios de Altura Bajo la Carga (HSP), mm		
		Humedad	Temperatura		300N	500N	750N
		A	B	AB			
1	3	-1	-1	1	50.1	42.35	36.21
2	4	-1	1	-1	49.85	42.11	35.97
3	1	1	-1	-1	49.21	41.44	35.4
4	2	1	1	1	48.98	41.21	35.17

4.0.2.2 Estimación de los efectos de los factores sobre la dureza.

El efecto de un factor es igual a la media de las respuestas a un nivel alto menos la media de las respuestas a un nivel bajo. Por ejemplo, en la Tabla 7 podemos observar que para calcular el efecto de A (Humedad Relativa), se han dividido los resultados promedio experimentales en dos grupos: uno de ellos cuando el factor A (humedad relativa) se encontraba en su nivel bajo y el grupo restante corresponde a los resultados obtenidos cuando el factor A se encontraba en su nivel alto. Después se efectúa la suma de los resultados para cada grupo de datos y se obtiene el promedio; finalmente se efectúa la suma algebraica de estos promedios, tomando en cuenta que el promedio obtenido para el caso de cuando el factor A se encuentra en su nivel bajo tiene un signo algebraico negativo y el promedio para el caso del factor A en su nivel alto tiene un signo algebraico positivo. De esta forma, para el ejemplo descrito se obtuvo un efecto de 0.91.

Los resultados del cálculo de los efectos de los factores hidrotérmicos estudiados sobre la medición de la dureza son mostrados en las Tablas 7, 8, 9 y 10, y todos ellos fueron calculados de acuerdo a la forma descrita en el párrafo anterior. Además las Figuras 3 y 4 ilustran los efectos de la humedad relativa y la temperatura sobre la medición de la dureza para el cojín CAV J64. Estos mismos efectos son representados por las Figuras 5, 6, 7 y 8 para el caso de la pieza CAV 948.

Tabla 7: Tabla de respuestas y cálculo de los efectos de los factores para el cojín CAV J64 (E 300N)

No. de control	Humedad		Temperatura		Interacción	
	A		B		AB	
	-1	1	-1	1	-1	1
1	30.73		30.73			30.73
2	31.19			31.19	31.19	
3		31.71	31.71		31.71	
4		32.02		32.02		32.02
Total	61.92	63.73	62.44	63.21	62.9	62.75
Promedio	30.96	31.87	31.22	31.61	31.45	31.38
Efecto	0.91		0.39		-0.075	

Tabla 8: Tabla de respuestas y cálculo de los efectos de los factores para el cojín CAV 948 (HSP 300N)

No. de control	Humedad A		Temperatura B		Interacción AB	
	-1	1	-1	1	-1	1
1	50.1		50.1			50.1
2	49.9			49.85	49.9	
3		49.2	49.2		49.2	
4		49		48.98		49
Total	100	98.2	99.3	98.83	99.1	99.1
Promedio	50	49.1	49.7	49.42	49.5	49.5
Efecto	-0.88		-0.24		0.01	

Tabla 9: Tabla de respuestas y cálculo de los efectos de los factores para el cojín CAV 948 a (HSP 500N)

No. de control	Humedad A		Temperatura B		Interacción AB	
	-1	1	-1	1	-1	1
1	42.35		42.35			42.35
2	42.11			42.11	42.11	
3		41.44	41.44		41.44	
4		41.21		41.21		41.21
Total	84.46	82.65	83.79	83.32	83.55	83.56
Promedio	42.23	41.33	41.9	41.66	41.78	41.78
Efecto	-0.9		-0.24		0	

Tabla 10: Tabla de respuestas y cálculo de los efectos de los factores para el cojín CAV 948 (HSP 750N)

No. de control	Humedad A		Temperatura B		Interacción AB	
	-1	1	-1	1	-1	1
1	36.21		36.21			36.21
2	35.97			35.97	35.97	
3		35.4	35.4		35.4	
4		35.17		35.17		35.17
Total	72.18	70.57	71.61	71.14	71.37	71.38
Promedio	36.09	35.29	35.81	35.57	35.69	35.69
Efecto	-0.8		-0.24		0	

4.0.2.3 Discusión de resultados.

Una vez obtenidos los resultados experimentales y las gráficas correspondientes podemos observar dos comportamientos diferentes en los valores de la mediciones de dureza para los cojines CAV J64 y CAV 948 en función de las variaciones de las condiciones hidrotérmicas bajo las cuales se efectuaron las mediciones.

En el caso de cojín CAV J64 podemos observar primero en la Figura 3, la influencia de la humedad relativa sobre las mediciones de dureza. En esta Figura resulta evidente que se presenta un incremento en los valores de dureza obtenidos conforme se incrementa la humedad relativa del cuarto en donde se efectúa la medición. Nótese que este comportamiento se observa independientemente de que la temperatura del cuarto sea de 21° C o de 25° C. Por otro lado, en la Figura 4 se observa la influencia de la temperatura sobre las mediciones de dureza. También en este caso es notorio que un incremento en la temperatura del cuarto en donde se realiza la medición propicia un incremento en los valores de dureza registrados en la medición.

Por otro lado, para el caso del cojín CAV 948, en las Figuras 5 y 7 podemos observar el efecto de la humedad relativa sobre las mediciones de dureza, tanto a 300 N como a 750 N de fuerza aplicada, en donde al incrementarse la humedad relativa del cuarto en donde se realiza la medición disminuyen los valores de las lecturas de las mediciones de la dureza. En tanto que en las figuras 6 y 8 es posible observar que la temperatura presenta un efecto similar sobre los valores de las mediciones de la dureza.

En la Tabla 7 se indican los valores de los efectos de los factores analizados en el caso del cojín CAV J64, y de esta forma el efecto obtenido para el factor A (humedad relativa) tiene un valor de 0.91, el valor del efecto del factor B (temperatura) es de 0.39 y el valor del efecto de la interacción (AB) es de -0.07. Con base en el análisis de variancia (Tabla 11) y también de acuerdo al análisis de las gráficas obtenidas, es posible indicar que tanto la temperatura como la humedad relativa afectan los resultados de las mediciones de dureza para el caso del cojín CAV J64; sin embargo, en este caso la interacción de ambos factores es prácticamente insignificante.

En las Tablas 8, 9 y 10 se presentan los valores de los efectos de la temperatura (A) y de la humedad relativa (B) para el cojín CAV 948 a 300 N, 500 N y 750 N de fuerza aplicada respectivamente. En todos los casos obtuvimos valores alrededor de -0.8 para el factor A, un valor de -0.24 para el efecto del factor B y un valor cercano a 0 para el efecto de la interacción. En las Tablas 12 y 13 se presentan los análisis de variancia para CAV 948 a 300 y 750 N respectivamente, y de acuerdo a los resultados, tanto la temperatura como la humedad relativa influyen sobre los resultados de las mediciones de dureza. Además, el efecto de la interacción de ambos factores también es prácticamente insignificante.

TABLA 11: ANÁLISIS DE VARIANCIA DE LOS FACTORES HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA CON REPETICIÓN DE EXPERIMENTOS PARA CAV J64

Informe Detallado T = 21° C	Humedad Relativa (HR) 45%	Humedad Relativa (HR) 55%	Total
No. de muestras	3	3	6
Suma	92.13	95.14	187.27
Media	30.73	31.71	62.44
Variancia	0.0048	0.016	0.0208

Informe Detallado T = 25° C	Humedad Relativa (HR) 45%	Humedad Relativa (HR) 55%	Total
No. de muestras	3	3	6
Suma	93.57	96.01	189.58
Media	31.19	32.02	63.21
Variancia	0.018	0.016	0.034

Informe Detallado Total	Humedad Relativa (HR) 45%	Humedad Relativa (HR) 55%
No. de muestras	6	6
Suma	185.7	191.15
Media	61.92	63.73
Variancia	0.0228	0.032

ANÁLISIS DE VARIANCIA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	F	F _{crítica}
HR	2.47	1	2.47	164.7	5.32
Temperatura	0.44	1	0.44	29.3	5.32
Interacción	0.027	1	0.027	1.8	5.32
Residuo	0.12	8	0.015		
Total	3.057	11			

TABLA 12: ANÁLISIS DE VARIANCIA DE LOS FACTORES HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA CON REPETICIÓN DE EXPERIMENTOS PARA CAV 948 A 300 N

Informe Detallado T = 21° C	Humedad Relativa (HR) 45%	Humedad Relativa (HR) 55%	Total
No. de muestras	3	3	6
Suma	150.3	147.63	297.93
Media	50.1	49.21	99.31
Variancia	0.026	0.007	0.033

Informe Detallado T = 25° C	Humedad Relativa (HR) 45%	Humedad Relativa (HR) 55%	Total
No. de muestras	3	3	6
Suma	149.55	146.94	296.49
Media	49.85	48.98	98.83
Variancia	0.005	0.016	0.021

Informe Detallado Total	Humedad Relativa (HR) 45%	Humedad Relativa (HR) 55%
No. de muestras	6	6
Suma	299.85	294.57
Media	99.95	98.19
Variancia	0.031	0.023

ANÁLISIS DE VARIANCIA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	F	F _{crítica}
HR	2.32	1	2.32	158.9	5.32
Temperatura	0.173	1	0.173	11.85	5.32
Interacción	0.0003	1	0.0003	0.02	5.32
Residuo	0.1167	8	0.0146		
Total	2.61	11			

TABLA 13: ANÁLISIS DE VARIANCIA DE LOS FACTORES HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA CON REPETICIÓN DE EXPERIMENTOS PARA CAV 948 A 750 N

Informe Detallado T = 21° C	Humedad Relativa (HR) 45%	Humedad Relativa (HR) 55%	Total
No. de muestras	3	3	6
Suma	108.63	106.2	214.83
Media	36.21	35.4	71.61
Variancia	0.02	0.015	0.035

Informe Detallado T = 25° C	Humedad Relativa (HR) 45%	Humedad Relativa (HR) 55%	Total
No. de muestras	3	3	6
Suma	107.91	105.51	213.42
Media	35.97	35.17	71.14
Variancia	0.011	0.01	0.021

Informe Detallado Total	Humedad Relativa (HR) 45%	Humedad Relativa (HR) 55%
No. de muestras	6	6
Suma	216.54	211.71
Media	72.18	70.57
Variancia	0.031	0.025

ANÁLISIS DE VARIANCIA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	F	F _{crítica}
HR	1.94	1	1.94	141.1	5.32
Temperatura	0.17	1	0.17	12.36	5.32
Interacción	0.00007	1	0.00007	5.4x10 ⁻³	5.32
Residuo	0.11	8	0.01375		
Total	2.22	11			

4.0.2.4 Modelación.

La modelación consiste en investigar la relación que liga a todos los factores influenciadores, mediante el cálculo de coeficientes para cada uno de ellos, de manera tal que es posible obtener una ecuación de trabajo. Con el fin de establecer una primera aproximación de dicha ecuación de trabajo, hemos calculado primero los coeficientes de los factores influenciadores y enseguida para validarlo, hemos efectuado varias pruebas complementarias tomando los niveles centrales de los factores, es decir Humedad Relativa (HR) = 50% y Temperatura (T) = 23° C.

a) Cálculo de los coeficientes de los factores.

a.1) Coeficiente de HR:

$$a = (- 30.73 - 31.19 + 31.71 + 32.02) / 4 = 0.45$$

a.2) Coeficiente de T:

$$b = (- 30.73 + 31.19 - 31.71 + 32.02) / 4 = 0.2$$

a.3) Coeficiente de la interacción de HR y T:

$$ab = (30.73 - 31.19 - 31.71 + 32.02) / 4 = -0.04$$

b) Pruebas Complementarias.

A = 50%; B = 23° C

Los resultados se presentan en la siguiente Tabla:

E 300N, (mm)
31.25
31.33
31.65
31.56
31.47
Media: 31.45
Desviación Estándar: 0.15

Tabla 14

Estas pruebas proporcionan una media de 31.45 que es comparable a la media de las primeras pruebas, que es de 31.41.

c) Validez del modelo.

Se puede admitir que un modelo lineal se ajusta convenientemente. Así:

$$E_{H, T} = E_{50, 23} + 0.45A + 0.2B \quad (1)$$

donde,

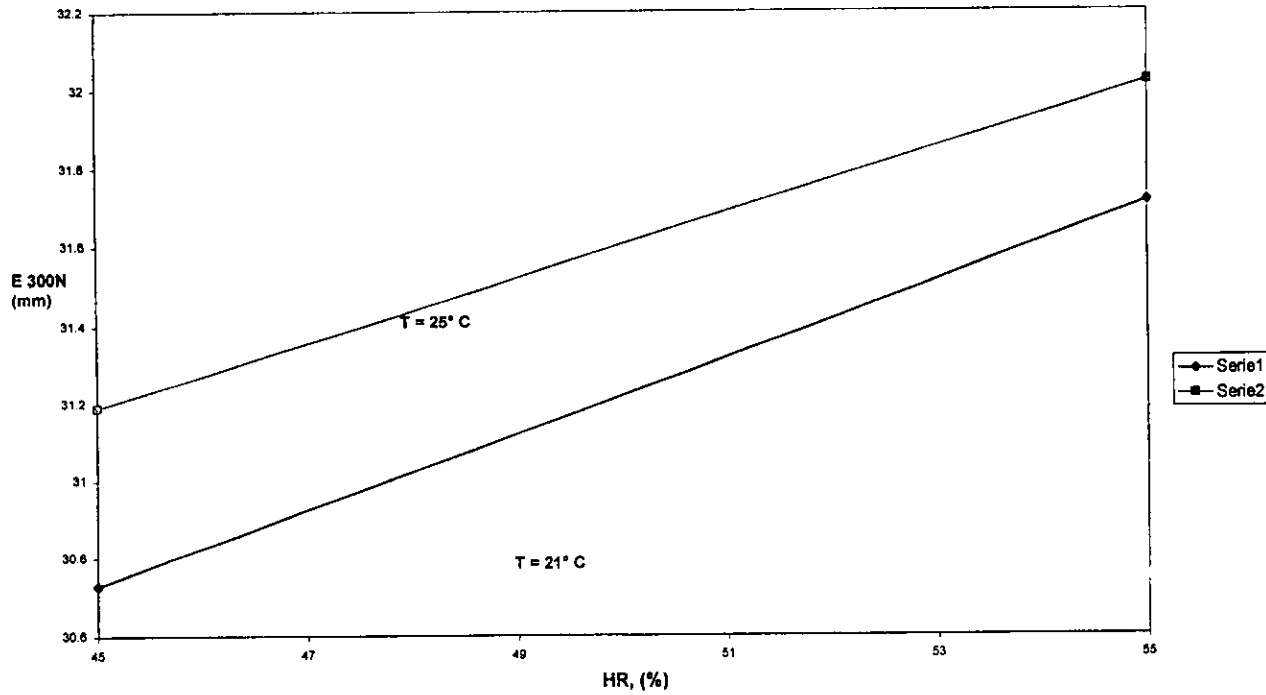
$E_{H, T}$: Hundimiento obtenido con una tasa de humedad relativa H y a la temperatura T.

$E_{50, 23}$: Hundimiento obtenido con 50% HR y a 23° C.

0.45A : Contribución de la humedad relativa.

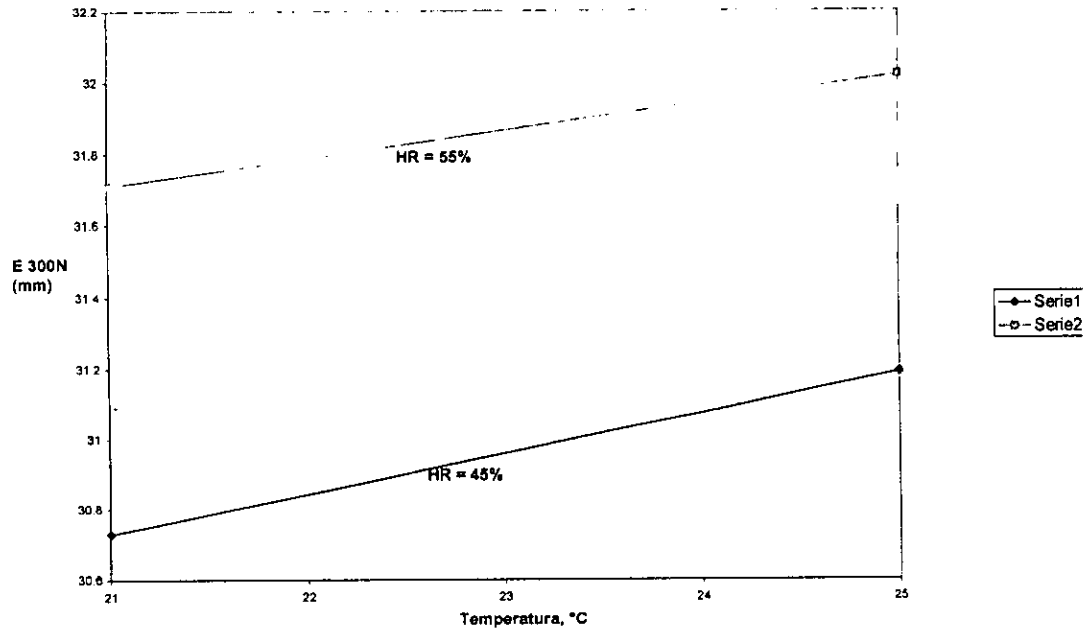
0.20B : Contribución de la temperatura

Figura 3: Efecto de la Humedad Relativa (HR) sobre la dureza de CAVJ64



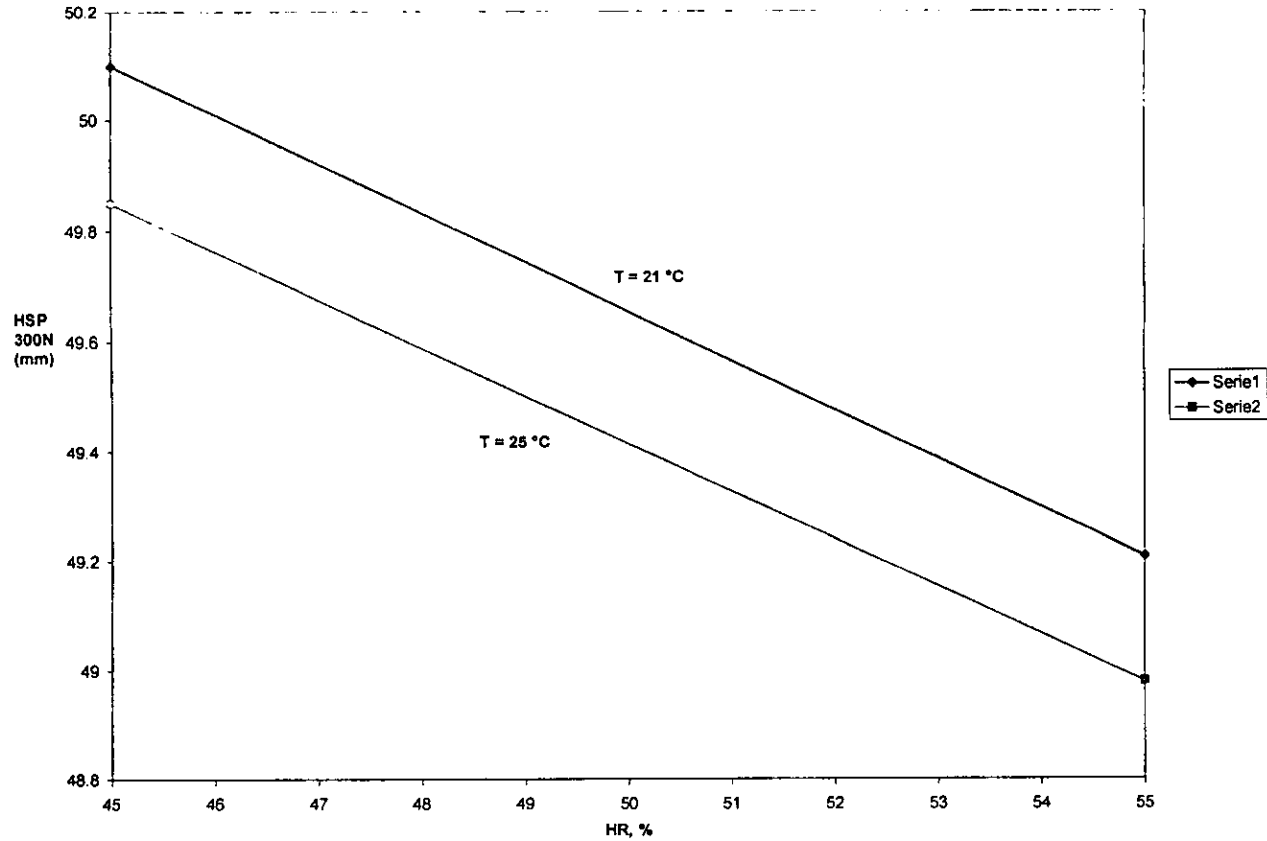
Nota: En esta gráfica se expresa la dureza de los cojines como el Hundimiento (E) expresado en milímetros.

Figura 4: Efecto de la Temperatura sobre la dureza de CAVJ64



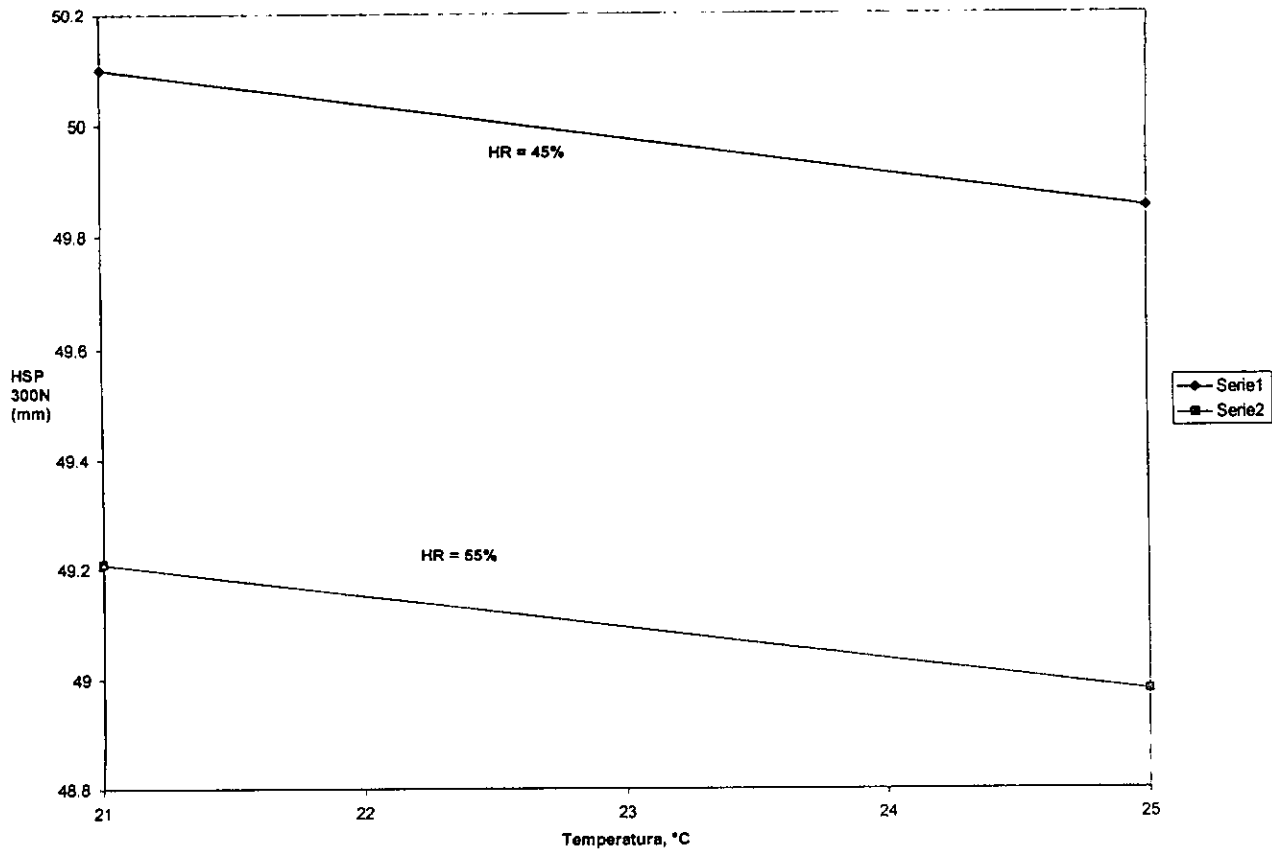
Nota: En esta gráfica se expresa la dureza de los cojines como el Hundimiento (E) expresado en milímetros.

Figura 5: Efecto de la Humedad Relativa (HR) sobre la dureza de CAV948 a 300N



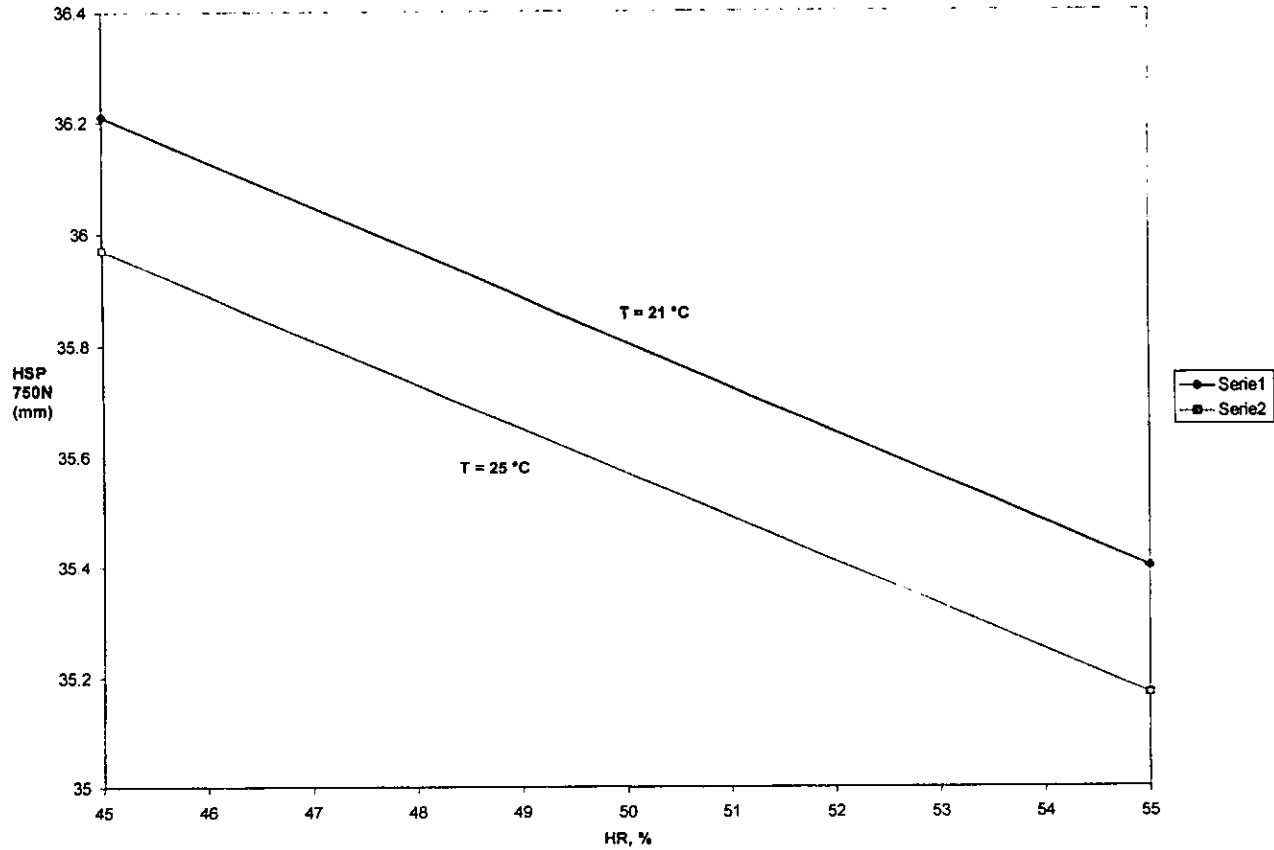
Nota: En este caso se expresa la dureza de los cojines como la Altura Bajo Peso (HSP) expresada en milímetros.

Figura 6: Efecto de la Temperatura sobre la dureza de CAV948 a 300N



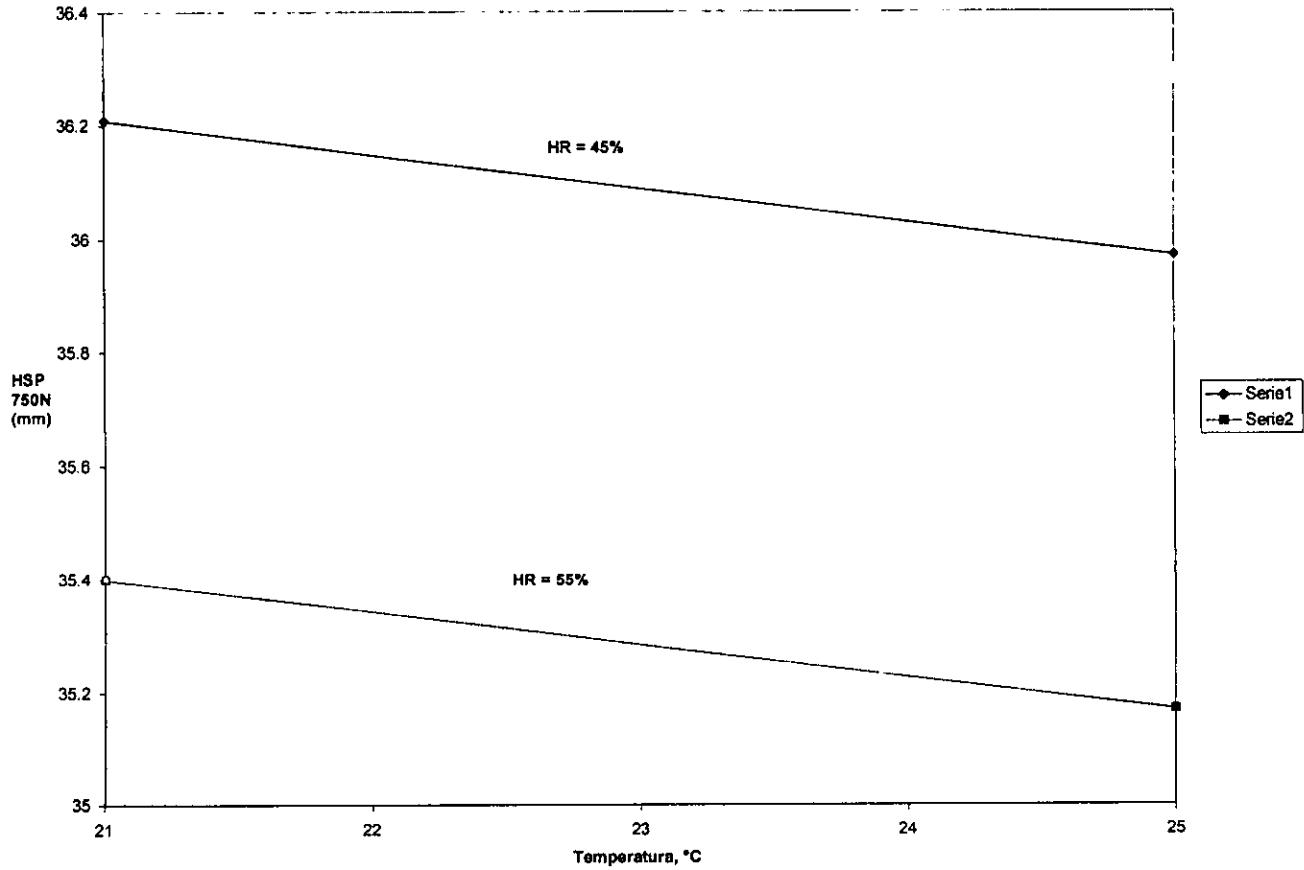
Nota: En este caso se expresa la dureza de los cojines como la Altura Bajo Peso (HSP) expresada en milímetros.

Figura 7: Efecto de la Humedad Relativa (HR) sobre la dureza de CAV 948 a 750N



Nota: En este caso se expresa la dureza de los cojines como la Altura Bajo Peso (HSP) expresada en milímetros.

Figura 8: Efecto de la Temperatura sobre la dureza de CAV948 a 750N



Nota: En este caso se expresa la dureza de los cojines como la Altura Bajo Peso (HSP) expresada en milímetros.

Es posible notar que sólo se incluyeron en la ecuación los coeficientes para los factores A y B, mientras que el coeficiente de la interacción se omitió. Lo anterior se debe a que de acuerdo al análisis de variancia presentado en la Tabla 11, sólo los factores A y B presentan efectos significativos sobre las mediciones de dureza, y la interacción de estos dos factores no tiene una influencia significativa.

A partir de este modelo se ha podido determinar una relación que permite calcular la corrección que es necesario realizar a la medición de la dureza en función de la tasa de HR y de la temperatura para obtenerla en las condiciones de medición estándar (HR = 50% y T= 23° C).

$$E_{50, 23} = E_{H, T} - [0.09 (H-50) + 0.1 (T - 23)] \quad (2)$$

Donde 0.09 es el coeficiente que determina la variación del hundimiento cuando la tasa de HR varía 1% y 0.1 es el coeficiente que establece la variación del hundimiento cuando la temperatura varía 1° C. En este punto cabe señalar que en la ecuación original (1) las variables A y B sólo pueden tomar los valores (-1, 0 y 1), ya que se encuentran codificadas por el diseño experimental, y los coeficientes calculados para dicha ecuación representan el valor asociado con el cambio en estas variables dentro de los valores codificados, por lo que para transformar estos coeficientes para obtener la ecuación (2) es necesario establecer una relación de proporcionalidad con base en los intervalos de los factores y los niveles de trabajo. Por ejemplo, para el caso de la humedad relativa (factor A), el intervalo de trabajo es de 45% a 55%, donde 45% equivale al nivel (-1), 50% equivale al nivel 0 y 55% representa el nivel 1. En el intervalo de trabajo tenemos 10 unidades porcentuales de diferencia (55% - 45%=10), y con respecto a los niveles del diseño experimental tenemos 2 unidades de diferencia [(1 - (-1)) =2] al pasar del nivel inferior al superior. Considerando el coeficiente calculado para la ecuación (1), tenemos un valor de 0.45 para el caso del factor A, que sólo puede tomar los valores codificados (-1, 0 y 1), por lo que si deseamos expresar este coeficiente con relación al cambio por unidad porcentual de la variable no codificada, establecemos la relación de proporcionalidad correspondiente y obtenemos el valor del coeficiente para la variable no codificada mediante la operación $x = ((2 \cdot 0.45) / 10) = 0.09$, en donde x es el coeficiente para la variable no codificada, 2 representa el cambio en los niveles para la variable codificada, y 10 es el cambio para la variable no codificada. Procediendo de igual forma para el factor temperatura, obtenemos el valor de 0.1 para el coeficiente de la variable no codificada.

4.0.2.5 Acciones correctivas.

- Acondicionar la sala de medición a 50% ± 5% de HR y a 23° C ± 2° C de temperatura.
- Ambientar los cojines a las que se les va a determinar la dureza durante 12 horas al menos antes de efectuar la medición.

4.0.3 Conclusiones.

Hemos evaluado la capacidad del instrumento de medición de la dureza sobre cada pieza entera. Al efectuar cambios en el modo de operación se ha podido mejorar la capacidad de la medición de los cojines CAV 948, pasando de un valor promedio de 1.6 a 4.24. Por otro lado, verificamos que la capacidad de medición para los cojines CAV J64 es adecuada, ya que presenta valores promedio cercanos a 3.9.

Un diseño experimental nos ha permitido estimar los efectos de las variaciones de la humedad relativa y de la temperatura de cuarto en donde se efectúan las mediciones sobre las determinaciones de la dureza de los cojines. En este sentido, hemos observado una variación importante en los resultados de dureza cuando las condiciones hidrotérmicas bajo las cuales se efectúa la medición cambian. De esta forma también se estableció una ecuación de corrección para ajustar los resultados de dureza a las condiciones de humedad relativa y temperatura de referencia.

Además, con base en los resultados obtenidos y atendiendo a nuestras recomendaciones un sistema de regulación de temperatura y humedad relativa se ha puesto en marcha.

Finalmente, fue posible disminuir las variaciones en los resultados de las mediciones de la dureza analizando exclusivamente el proceso de medición y sin interferir con el proceso de fabricación de los cojines. Esta mejora resulta de un mejor manejo de las condiciones de operación durante las mediciones de dureza.

Segunda Parte: Dispersión debida al proceso de fabricación

4.1.- Dispersión debida al proceso de fabricación.

En la primera parte de este trabajo nos concentramos en el proceso de medición de los cojines como fuente posible de diversas causas responsables de la variación presentada en los valores de dureza de dichos cojines y efectivamente fue posible mejorar algunos aspectos del modo de operación durante el proceso de medición.

En esta segunda parte complementaremos el estudio de las fuentes posibles de variación de los valores de dureza de los cojines atendiendo ahora al proceso de fabricación de los mismos. Para ello, primero hemos analizado los factores involucrados en el proceso de fabricación susceptibles de influir sobre la dispersión de la dureza de los cojines. De esta forma se organizó una sesión de expertos en donde aplicando algunas herramientas de calidad, como la Lluvia de ideas y el diagrama Causa-Efecto, se discutieron los posibles factores relacionados con el proceso de producción que podrían estar influyendo en los valores de dureza de los cojines. Como resultado de la sesión anterior fue posible construir el diagrama Causa-Efecto presentado en el Anexo 1. De los factores discutidos durante la sesión de expertos se eligieron los siguientes para su estudio: tipo de vaciado, molde empleado, temperatura del molde, número de ciclos de prensado, engrosamiento del molde, fugas del molde, dimensión del molde y cantidad de catalizador.

En virtud de que fueron seleccionados varios factores como posibles responsables de las variaciones en los valores de dureza de los cojines, optamos por emplear la técnica del diseño de experimentos para facilitar el estudio de dichos factores y organizar efectivamente la cantidad y el tipo de experimentos a realizar para tal efecto. Por otro lado, los resultados obtenidos al realizar los experimentos serán organizados y estudiados utilizando la técnica de análisis de variancia para establecer si la influencia de los factores en estudio es significativa o no.

De esta forma los diseños de experimentos pueden servir para identificar los ajustes de los parámetros que reducen la variación de la dureza, mientras que el análisis de variancia aporta un umbral de significación estadística permitiendo medir la parte debida al azar (incertidumbre) en el proceso de fabricación. En el Anexo 3 se discuten con mayor amplitud los diseños experimentales y el análisis de variancia.

4.1.1 Estudio de la influencia del tipo de vaciado en las líneas de fabricación 5 y 6.

Uno de los factores analizados en la sesión de Expertos fue el tipo de vaciado, ya que los cojines en estudio se fabrican básicamente en líneas con dos diferentes configuraciones en cuanto al número de moldes; de esta forma, algunas de las líneas de fabricación están configuradas con 40 moldes y otras con 12 moldes. En este experimento se seleccionaron las líneas de fabricación 5 y 6 de manera aleatoria para verificar si el tipo de vaciado presenta alguna influencia sobre los valores promedio de la dureza de los cojines.

4.1.1.1 Modo de operación.

Se tomaron dos muestras de 20 piezas CAVJ64 cada una, la primera de ellas proveniente de la línea 5 y la otra de la línea 6, y fabricadas con el mismo molde; estas muestras se midieron sucesivamente. Todos los demás parámetros de la operación de vaciado tales como la formulación de los componentes, el prensado de las telas y las temperaturas de los productos son idénticos para las dos líneas. No obstante, la configuración de la carga a los moldes no es la misma: 40 moldes se encuentran instalados en la línea 5 contra sólo 12 en la línea 6. Recordemos

que se para de llenar todos los moldes, con excepción del molde de prueba, a partir de la décimo tercera pieza. De esta forma, el único factor que se está estudiando en este experimento es el tipo de vaciado relacionado con la cantidad de moldes que componen cada línea de producción.

4.1.1.2 Resultados y discusión.

Los resultados se presentan en la Figura 9. Se observa que la línea 6 produce piezas mas duras que las de la línea 5, aún si el cálculo de la media del hundimiento de la muestra de la línea 6 se hace sólo sobre las 13 primeras piezas.

Además, se puede constatar que la dispersión en los valores obtenidos para las mediciones de dureza se hace mayor a partir del momento de parar el llenado de los otros moldes; esta situación es mas evidente en la línea de producción 6. De acuerdo a lo anterior, el hecho de producir los cojines en una línea con una menor carga (es decir, con un número menor de moldes) afecta la dispersión de los valores de dureza de las piezas producidas de esta forma. En este sentido se sugiere que cuando se fabriquen los cojines en líneas con menor carga se intensifique la vigilancia del proceso para hacer los ajustes necesarios y disminuir la variación en los valores de dureza.

4.1.2 Diseño experimental con tres factores.

El diseño considerado en este párrafo sirve para evaluar los efectos de tres posibles factores influenciadores sobre la dureza de las piezas CAVJ64: el molde empleado, la temperatura del molde y el número de ciclos de prensado. Los niveles seleccionados para cada uno de ellos se indican en la Tabla 15. En el caso del factor A (No. de molde) se seleccionaron al azar dos moldes para que uno de ellos represente el nivel bajo, mientras que el otro representa el nivel alto. Para el factor B (temperatura del molde) se seleccionó como nivel bajo una temperatura de 55° C, mientras que para el nivel alto la temperatura elegida fue 65° C, tomando en cuenta que el valor normal promedio de este parámetro es cercano a 60° C. Para el factor C (Número de ciclos de prensado) se consideraron como niveles de trabajo el menor y el mayor número de ciclos de prensado empleados en el proceso. Todos los experimentos han sido llevados a cabo con seis réplicas, es decir que las ocho combinaciones de los niveles se probaron seis veces cada una, lo que da un total de 48 pruebas y los resultados se muestran en la Tabla 16.

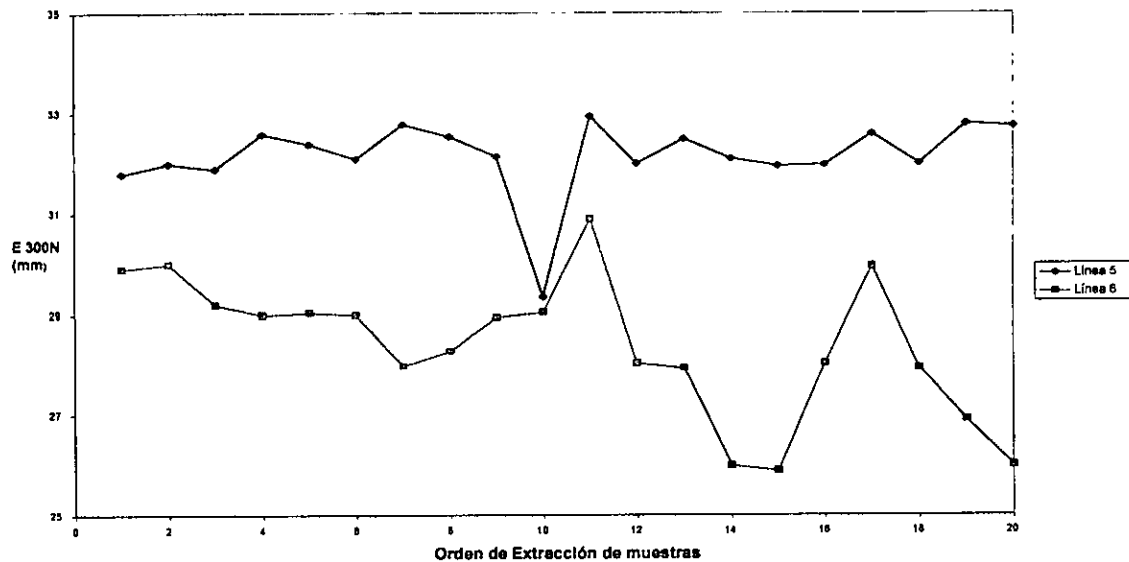
TABLA 15: NIVELES SELECCIONADOS PARA LOS FACTORES EN ESTUDIO

Factor	Nivel Bajo (-1)	Nivel Alto (1)
A: No. de molde	No. 6	No. 15
B: Temperatura del molde	55° C	65° C
C: Número de ciclos de prensado	2	4

Estos factores pueden influir sobre la dureza de dos maneras:

- a) Modificando el valor promedio de la dureza,
- b) Cambiando la dispersión en los valores individuales de la dureza de las piezas (la amplitud de la variabilidad).

Figura 9: Dispersión debida al tipo de Vaclado



Parámetros	Línea 5	Línea 6
Media	32.11	29.08
Desviación Estándar	0.71	0.76

TABLA 16: MATRIZ DE EXPERIMENTOS PARA EL COJÍN CAV J64

No. Control	No. Aleatorio	Factores			Valores de Hundimiento Obtenidos E 300N, (mm)						Media	Σx
		A	B	C								
1	3	-1	-1	-1	32.43	34.21	32.95	33.48	32.9	32.21	33.03	198.18
2	1	-1	-1	1	33.64	33.91	33.89	33.75	33.9	34.13	33.87	203.22
3	4	-1	1	-1	30.79	30.87	31.52	31.61	30.65	31.64	31.18	187.08
4	2	-1	1	1	33.15	33.41	33.49	33.18	33.09	33.72	33.34	200.04
5	6	1	-1	-1	31.42	32.35	32.29	31.52	31.86	32.44	31.98	191.88
6	5	1	-1	1	33.51	33.48	33.26	33.19	33.08	33.52	33.35	200.1
7	8	1	1	-1	32.36	31.92	31.73	32.24	31.64	31.69	31.93	191.58
8	7	1	1	1	32.78	33.09	32.85	33.11	33.26	32.73	32.97	197.82

4.1.2.1 Estimación de los efectos sobre los valores de la media.

$E_A = -0.3$
 $E_B = -0.7$
 $E_C = 1.35$
 $E_{AB} = 0.49$
 $E_{AC} = -0.15$
 $E_{BC} = 0.25$
 $E_{ABC} = -0.41$

4.1.2.2 Estimación de los efectos de los valores sobre la dispersión.

$E_A = -0.23$
 $E_B = -0.21$
 $E_C = 0.07$
 $E_{AB} = 0.06$
 $E_{AC} = -0.19$
 $E_{BC} = 0.14$
 $E_{ABC} = -0.18$

4.1.2.3 Discusión de los resultados.

Una vez que hemos calculado los efectos de los factores tanto para el caso de su efecto sobre los valores de la media como para el caso de su efecto sobre los valores de la dispersión de la dureza procederemos a su análisis.

Del análisis de los valores calculados para los efectos de los factores en cuanto a su influencia sobre los valores de la media podemos notar que los efectos con un mayor valor absoluto corresponden a los factores B (temperatura del molde) y C (número de ciclos de prensado), lo que es indicativo de que estos factores son lo que presentan mayor influencia sobre la media de la dureza de los cojines y es posible mencionar que:

- a) Si durante el proceso se ejecutan cuatro ciclos de prensado en lugar de solamente dos, se produce un ablandamiento medio de 1.05 mm y
- b) Cuando se pasa de 55° C a 65° C se produce un endurecimiento de 1.19 mm

Los efectos estimados sobre la media se presentan en la Figura 10, y en ella podemos observar los valores promedio del hundimiento (E) obtenidos a los diferentes niveles de los factores B (temperatura del molde) y C (número de ciclos de prensado). En esta gráfica es posible notar que el mayor valor promedio del hundimiento se obtiene cuando se trabaja con cuatro ciclos de prensado y a una temperatura del molde de 55° C; lo cual nos indica que es bajo estas condiciones a las cuales se obtienen cojines mas blandos.

Figura 10: Efectos estimados sobre la media de E 300N

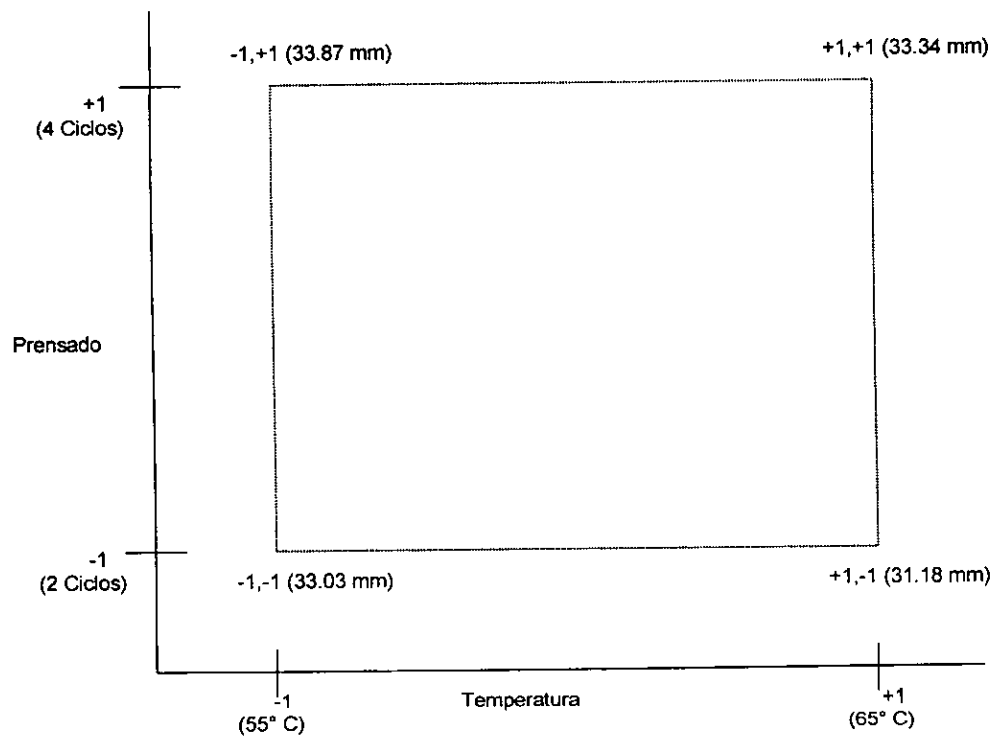
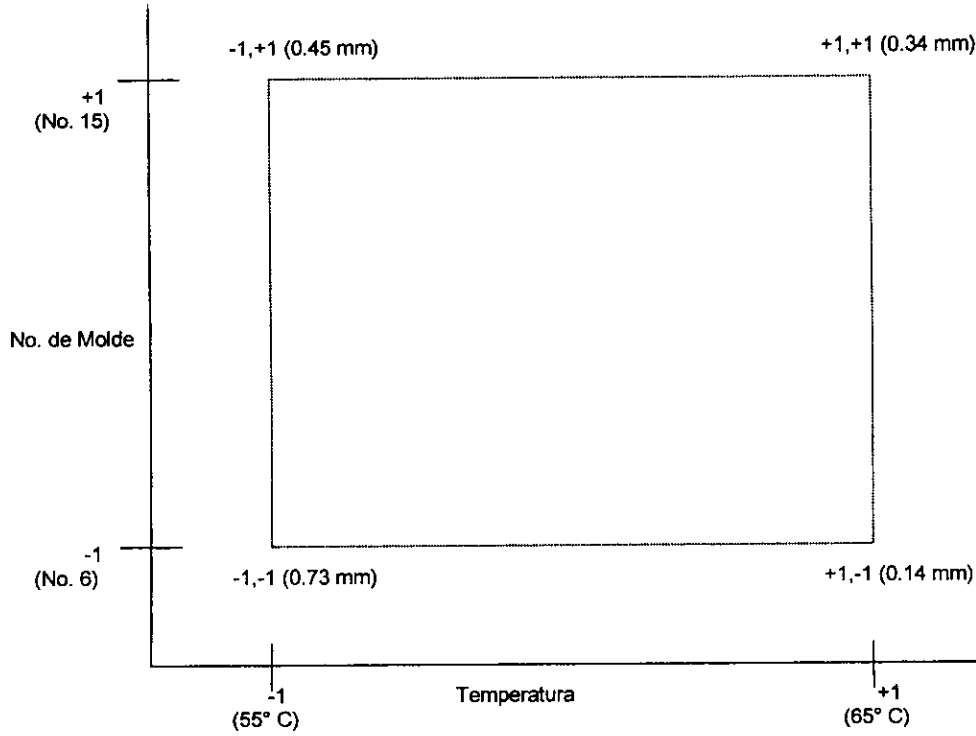


Figura 11: Efectos estimados sobre la dispersión (desviación estándar) de E 300N



Por otro lado, los factores que parecen influir sobre la dispersión del hundimiento son el número de molde y la temperatura del molde, ya que son estos factores sus efectos son los que presentan el mayor valor absoluto de los tres factores analizados. En este caso podemos indicar que el valor de la desviación estándar disminuye en 0.35 unidades si se pasa de una temperatura de 55° C a 65° C.

Los efectos estimados sobre la dispersión se presentan en la Figura 11, y en ella se encuentran indicados los valores de la desviación estándar obtenidos a los diferentes niveles de trabajo de los factores A (No. de molde) y B (temperatura del molde). De acuerdo a esta gráfica, para minimizar la dispersión se debe asignar al factor A su nivel bajo (Molde No. 6) y al factor B su nivel alto también (65° C), ya que bajo estas condiciones se presentó el menor valor de la desviación estándar (0.14 mm).

4.1.3 Diseño de Experimentos con dos factores.

Con el diseño factorial precedente, se estableció que los factores del número de molde y temperatura del molde son los que tienen mayor influencia sobre la variación de los valores del hundimiento (E). Esto último nos condujo a rehacer el experimento sobre dos referencias, el CAVJ64 y el CAV948, incluyendo estos dos factores. Los niveles seleccionados de los factores se consignan en las Tablas 17 y 18, para el CAVJ64 y el CAV948 respectivamente. Para este experimento se seleccionaron al azar los moldes 1 y 12 para que representaran los niveles bajo y alto respectivamente. Cabe señalar que en este caso se decidió trabajar con otros valores de temperatura ligeramente mayores a los del experimento pasado, debido a que en dicho experimento se demostró que la dispersión en los valores de dureza se ve minimizada a mayores valores de temperatura.

TABLA 17: NIVELES SELECCIONADOS PARA LOS FACTORES EN ESTUDIO (CAVJ64)

Factor	Nivel Bajo (-1)	Nivel Alto (1)
A: No. del molde	No. 1	No. 12
B: Temperatura del molde	60° C	67° C

TABLA 18: NIVELES SELECCIONADOS PARA LOS FACTORES EN ESTUDIO (CAV948)

Factor	Nivel Bajo (-1)	Nivel Alto (1)
A: No. del molde	No. 10	No. 12
B: Temperatura del molde	60° C	67° C

Las matrices de los diseños factoriales se presentan en las Tablas 19 y 20.

TABLA 19: MATRIZ DEL DISEÑO EXPERIMENTAL PARA CAVJ64

No. Control	No. Aleatorio	Factores		AB	Valores observados del hundimiento E300 N, (mm)					Media	Desviación Estándar
		A	B								
1	2	-1	-1	1	32.98	33.11	33.43	32.01	32.96	32.9	0.53
2	4	-1	1	-1	32.03	32.4	32.35	32.91	32.28	32.39	0.32
3	1	1	-1	-1	32.87	33.52	33.55	32.76	33.42	33.22	0.38
4	3	1	1	1	32.81	32.74	32.93	33.21	33.09	32.96	0.19

TABLA 20: MATRIZ DEL DISEÑO EXPERIMENTAL PARA CAV948

No. Control	No. Aleatorio	Factores		AB	Valores observados de la altura bajo carga HSP300 N, (mm)					Media	Desviación Estándar
		A	B								
1	2	-1	-1	1	49.5	49.25	50.28	49.42	49.54	49.6	0.4
2	3	-1	1	-1	49.62	50.03	49.72	49.83	50.04	49.85	0.17
3	1	1	-1	-1	48.36	48.46	48.93	48.96	48.19	48.58	0.35
4	4	1	1	1	49.15	48.84	48.91	48.76	48.68	48.87	0.17

4.1.3.1 Estimación de los efectos de los factores.

a) Efecto sobre la media del hundimiento del CAVJ64.

$$E_A = 0.45$$

$$E_B = -0.39$$

$$E_{AB} = 0.13$$

b) Efecto sobre la dispersión del CAVJ64.

$$E_A = -0.14$$

$$E_B = -0.2$$

$$E_{AB} = 0.01$$

c) Efecto sobre la media de la altura bajo peso del CAV948.

$$E_A = -1$$

$$E_B = 0.27$$

$$E_{AB} = 0.02$$

d) Efecto sobre la dispersión del CAV948.

$$E_A = -0.03$$

$$E_B = -0.12$$

$$E_{AB} = 0.02$$

4.1.4 Análisis de variancia.

Este análisis permite la generalización de una prueba:

a) Prueba de comparación de las medias.

Se compararán las medias de estas muestras con el fin de observar si dichas medias difieren entre ellas de manera significativa o, al contrario, estas diferencias pueden imputarse al azar. Esto permite concluir la influencia o la no influencia de los factores estudiados.

Las diferencias entre las medias pueden deberse a:

- a) Al efecto de causas incontrolables: Es la variación al interior de una muestra. Se refiere a la variación residual.
- b) Al efecto del factor controlado: Es la variación entre muestras.

Se dispondrá entonces de dos variancias independientes que se compararán con la prueba F (Fisher-Snedecor).

Si $F_{exp} > F_{teórica}$ dado a un nivel de $\alpha = 0.05$, se rechazará la hipótesis nula según la cual las muestras son obtenidas de una misma población. Este será el caso para la dispersión al interior de las muestras. Se concluirá que se trata de la influencia del factor controlado.

Hemos efectuado un análisis de variancia de los diseños de experimentos realizados anteriormente para observar si los factores estudiados son significativos. Los resultados se indican en las Tablas 21 y 22, para los cojines CAVJ64 y CAV948 sucesivamente.

4.1.4.1 Discusión de los resultados.

El análisis de estos resultados muestra que los dos factores estudiados influyen significativamente sobre la dureza del cojín CAVJ64 en el umbral del 5%, ya que de acuerdo con los datos consignados en la Tabla 21, los valores de F_{exp} para cada uno de los factores estudiados resultó ser mayor que la $F_{teórica}$. Se constata así mismo, que la interacción entre los factores estudiados es débil; esto último nos lleva a hacer un experimento de confirmación con el fin de evaluar el efecto de la temperatura del molde sobre la dureza del cojín CAVJ64 sobre muestras mas significativas y provenientes de moldes diferentes. Por el contrario, parece que la temperatura del molde es menos importante sobre la dureza del cojín CAV948, de acuerdo con los valores de F presentados en la Tabla 22. La significación del factor temperatura es ligeramente menor del umbral fijado. Por último podemos concluir que los moldes no proporcionan las mismas medias de dureza en ninguno de los dos casos. Un análisis de variancia del factor molde, incluyendo varios moldes se presentará después.

TABLA 21: ANÁLISIS DE VARIANCIA DE LOS FACTORES MOLDE Y TEMPERATURA DEL MOLDE CON REPETICIÓN DE EXPERIMENTOS PARA CAVJ64

Informe Detallado T = 60° C	Molde 1	Molde 12	Total
No. de muestras	5	5	10
Suma	164.49	168.12	330.61
Media	32.9	33.22	66.12
Variancia	0.28	0.14	0.42

Informe Detallado T = 67° C	Molde 1	Molde 12	Total
No. de muestras	5	5	10
Suma	161.97	164.78	326.75
Media	32.39	32.96	65.35
Variancia	0.103	0.038	0.141

Informe Detallado Total	Molde 1	Molde 12
No. de muestras	10	10
Suma	328.46	330.9
Media	65.29	66.18
Variancia	0.385	0.181

ANÁLISIS DE VARIANCIA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	F	$F_{crítica}$
T° del molde	0.74	1	0.74	5.26	4.49
Molde	0.99	1	0.99	6.96	4.49
Interacción	0.07	1	0.07	0.49	4.49
Residuo	2.26	16	0.14		
Total	4.07	19			

TABLA 22: ANÁLISIS DE VARIANCIA DE LOS FACTORES MOLDE Y TEMPERATURA DEL MOLDE CON REPETICIÓN DE EXPERIMENTOS PARA CAV948

Informe Detallado T = 60° C	Molde 1	Molde 12	Total
No. de muestras	5	5	10
Suma	247.99	242.9	490.89
Media	49.6	48.58	49.09
Variancia	0.16	0.12	0.41

Informe Detallado T = 67° C	Molde 1	Molde 12	Total
No. de muestras	5	5	10
Suma	249.24	244.34	493.58
Media	49.85	48.87	49.36
Variancia	0.03	0.03	0.3

Informe Detallado Total	Molde 1	Molde 12
No. de muestras	10	10
Suma	497.23	487.24
Media	49.72	48.72
Variancia	0.1	0.09

ANÁLISIS DE VARIANCIA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	F	F _{crítica}
T° del molde	0.36	1	0.36	4.19	4.49
Molde	4.99	1	4.99	57.84	4.49
Interacción	0.002	1	0.002	0.02	4.49
Residuo	1.38	16	0.09		
Total	6.73	19			

4.1.5 Prueba de confirmación del efecto de la temperatura del molde.

En este párrafo nos interesamos en el estudio del efecto de la temperatura del molde sobre muestras mas significativas.

El experimento consiste en tomar sobre cinco moldes diferentes, dos muestras de 20 piezas CAVJ64 cada una. Una muestra se fabrica a una temperatura del molde de 60°C y la otra a una temperatura de 67° C. Todos los otros parámetros permanecen constantes.

4.1.5.1 Prueba de confirmación del efecto de la temperatura del molde.

Los resultados se consignan en la Tabla 23. La Tabla de análisis de variancia muestra que hay una variación entre las dos muestras estudiadas. La muestra fabricada a 67° C presenta una dispersión inferior a la muestra fabricada a 60° C. Este resultado nos motiva para proponer a los servicios técnicos y al departamento de producción el realizar una prueba sobre las referencias estudiadas a 65° C durante una semana para permitirles evaluar la capacidad del proceso a esta temperatura.

TABLA 23: ANÁLISIS DE VARIANCIA PARA UN FACTOR: LA TEMPERATURA DEL MOLDE (CAVJ64)

Informe Detallado Grupos	No. de muestras	Suma	Media	Variancia
T° = 67° C	20	617.93	30.9	0.214
T° = 60° C	20	626.7	31.34	0.425

ANÁLISIS DE VARIANCIA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	F	F _{crítica}
Entre Grupos	1.92	1	1.92	6.02	4.1
Al interior de los grupos	12.14	38	0.32		
Total	14.06	39			

4.1.6 Estudio del efecto del molde.

Ya hemos observado a través de los diseños experimentales a dos factores y en sus análisis de variancia correspondientes, que los dos moldes estudiados para cada referencia no presentaban ni la misma media ni la misma dispersión de dureza de los cojines. El objetivo de este experimento es verificar la dispersión debida al molde utilizado. Consiste en tomar y medir muestras obtenidas de varios moldes de los cojines CAVJ64 y CAV948 fabricados en la línea 5.

4.1.6.1 Resultados y discusión.

Los resultados del análisis de variancia pueden observarse en las Tablas 24 y 25 para los cojines CAVJ64 y CAV948 respectivamente, y en las dos Tablas podemos observar que los valores de F_{exp} para la variación entre moldes fue mayor que la $F_{teórica}$, lo cual nos indica que efectivamente el molde empleado en la fabricación de los cojines es un factor que afecta la dureza de los mismos. Se puede constatar que ciertos moldes proporcionan piezas mas duras que otras y que la dispersión de la dureza difiere de un molde a otro. Las causas que parecen ser las responsables de la dispersión debido a los moldes se discutieron en una reunión de expertos del grupo de trabajo.

4.1.7 Análisis de las causas de dispersión debido a los moldes.

4.1.7.1 Engrosamiento del molde.

Se llevó a cabo un estudio para determinar el efecto del engrosamiento del molde sobre la dureza. Los resultados obtenidos no son significativos, por lo que no se presentan en este trabajo.

4.1.7.2 Influencia de las fugas del molde.

Se examinaron las fugas de los moldes que sirvieron para el estudio del efecto del molde. Se observó en efecto que los moldes utilizados para CAVJ64 (5, 6 y 14) que presentaron fugas proporcionaron piezas menos duras que los otros moldes (7 y 10). Esta conclusión de acuerdo al grupo de discusión debe tomarse con precaución, pues no es definitiva.

4.1.7.3 Efecto dimensional.

Se efectuó un control del dimensionamiento de los espesores de las piezas a nivel del eje de la prueba. Se observaron ciertas diferencias de las dimensiones que van hasta un valor de 2 mm entre los acojinamientos obtenidos de diferentes moldes. Sin embargo, no se puede concluir que el efecto de la dimensión del espesor de las piezas es significativa.

TABLA 24: ANÁLISIS DE VARIANCIA DEL FACTOR MOLDE PARA EL COJÍN CAVJ64

Informe Detallado Moldes	No. de muestras	Suma	Media	Variancia
1	5	147.91	29.58	0.2
5	5	150.93	30.19	0.35
6	5	152.09	30.42	0.11
7	5	145.41	29.04	0.13
10	5	144.97	28.99	0.4
14	5	152.23	30.45	0.12

ANÁLISIS DE VARIANCIA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	F	F _{crítica}
Entre moldes	11.09	5	2.22	10.17	2.62
Al interior de los moldes	5.23	24	0.22		
Total	16.32	29			

TABLA 25: ANÁLISIS DE VARIANCIA DEL FACTOR MOLDE PARA EL COJÍN CAV948

Informe Detallado Moldes	No. de muestras	Suma	Media	Variancia
1	5	247.69	49.54	0.007
2	5	247.29	49.46	0.087
3	5	247	49.4	0.168
4	5	244.37	48.88	0.158
6	5	245.16	49.03	0.237
7	5	249.42	49.88	0.127
9	5	245.53	49.11	0.072

ANÁLISIS DE VARIANCIA

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	F	F _{crítica}
Entre moldes	3.59	6	0.6	4.89	2.45
Al interior de los moldes	3.43	28	0.12		
Total	7.02	34			

4.1.7.4 Efecto de la temperatura del molde.

Se efectuó un control térmico de los moldes CAVJ64 y CAV948 con el fin de observar si existe una diferencia del calentamiento entre los moldes a la misma temperatura indicada en el proceso de fabricación. De este estudio se determinó que no existen diferencias importantes de la temperatura entre los moldes. Las desviaciones son debidas únicamente al estado de limpieza de dichos moldes.

4.1.8 Estudio de la influencia de la tasa de activador (Catalizador).

Este estudio consistió en estimar la dispersión de la dureza cuando se cambia la cantidad de activador.

Este experimento sirvió para seguir la dureza de los cojines en función de la variación de la cantidad del catalizador. Todas las piezas de prueba fueron fabricadas en el mismo molde. La dureza de las piezas se midió por la prueba HSP una hora después del desmoldamiento y luego, después de 24 horas en la máquina INSTRON, lo que nos permitió establecer una correlación entre las dos pruebas citadas. Si la correlación se sospecha importante, esto permitirá reaccionar con una hora de diferencia para rectificar el proceso si fuera necesario.

4.1.8.1 Resultados y discusión.

La variación de la dureza HSP (Altura bajo peso) de una hora en función de la cantidad de catalizador se presenta en la Figura 12. En esta figura podemos observar que se evaluaron cuatro diferentes niveles de catalizador: al 6.9%, al 7.2%, al 7.5% y al 7.8%. Como podemos notar, el intervalo en el que manejaron las diferentes cantidades de catalizador fue muy pequeño (0.9%), y sin embargo se presentó una variación importante en los valores de la Altura Bajo Peso (HSP). Se encontró así mismo para esta gráfica, un coeficiente de correlación de 0.94, el cual es indicativo de que efectivamente existe una relación lineal entre la cantidad de catalizador empleado y los valores de la Altura Bajo Peso (HSP) obtenidos una hora después del desmoldamiento. La variación de la dureza E300 a 24 horas en función de la cantidad de catalizador se presenta en la Figura 13. El coeficiente de correlación encontrado en este caso fue de -0.49, lo cual contradice la suposición y por lo tanto se desecha. En la Figura 14, se presenta una correlación entre la dureza HSP-1 hora y E300N-24 horas. El coeficiente de correlación calculado también contradice la suposición de correlación (- 0.57). Este resultado corrobora otros resultados del grupo de trabajo realizados con anterioridad. Así, las correcciones para rectificar la dureza sólo puede justificarse hasta 24 horas después del desmoldamiento.

Los resultados de este último estudio muestran que la tasa de catalizador influye sobre la dureza a 1 hora; mientras que por el contrario su variación no tiene influencia sobre la dureza E300N medida a 24 horas. Un experimento similar se ha efectuado para determinar la correlación entre la dureza E300N a 24 horas y la prueba HSP a 1.5 horas. Sin embargo, no se tiene evidencia de una mejora del coeficiente de correlación.

4.1.9 Conclusión.

En esta segunda parte hemos podido estudiar los efectos de los parámetros mas importantes de la fabricación de los acojinamientos, a pesar de algunas dificultades encontradas para establecer las acciones deseadas.

El análisis de los diferentes resultados del estudio muestra que los factores que mas influyen sobre la dureza del cojín son el molde y la temperatura del molde. Si en realidad no se ha podido dilucidar con precisión las causas responsables de la dispersión debida al molde, este

Figura 12: Variación de la Altura Bajo Peso a 1 Hora (HSP 1H) en función de la cantidad de catalizador

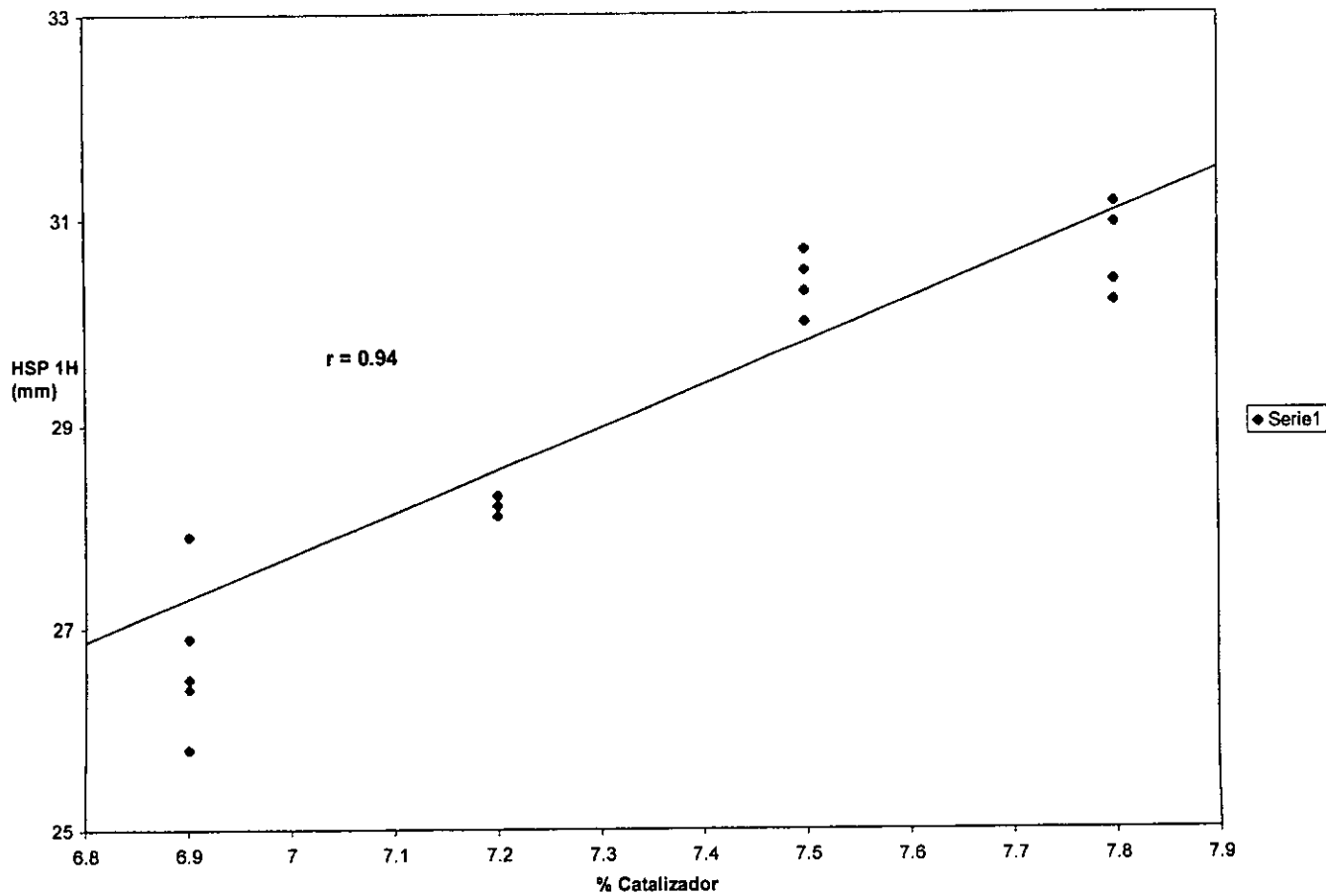


Figura 13: Variación del Hundimiento (E) a 300N en función de la cantidad de catalizador

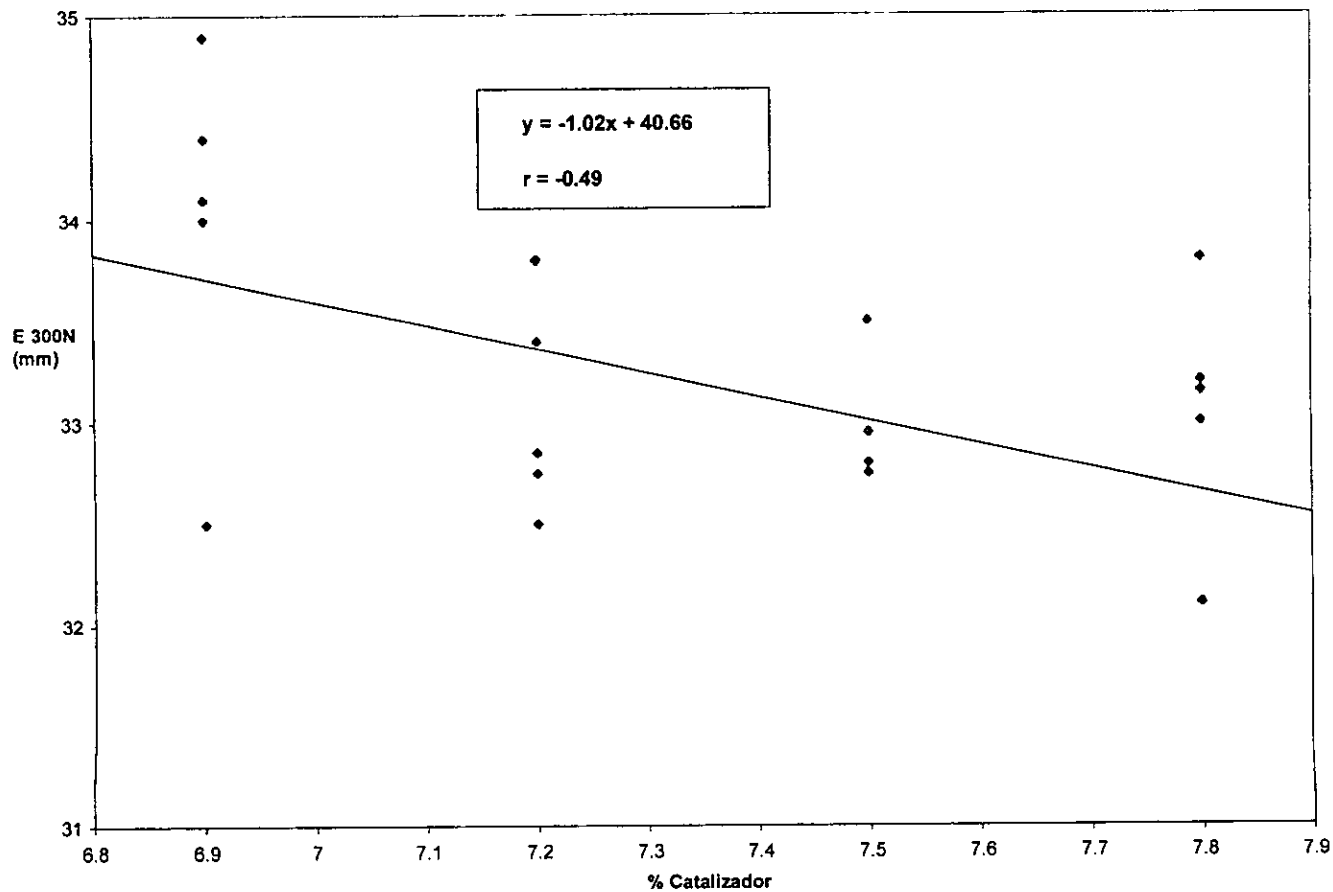
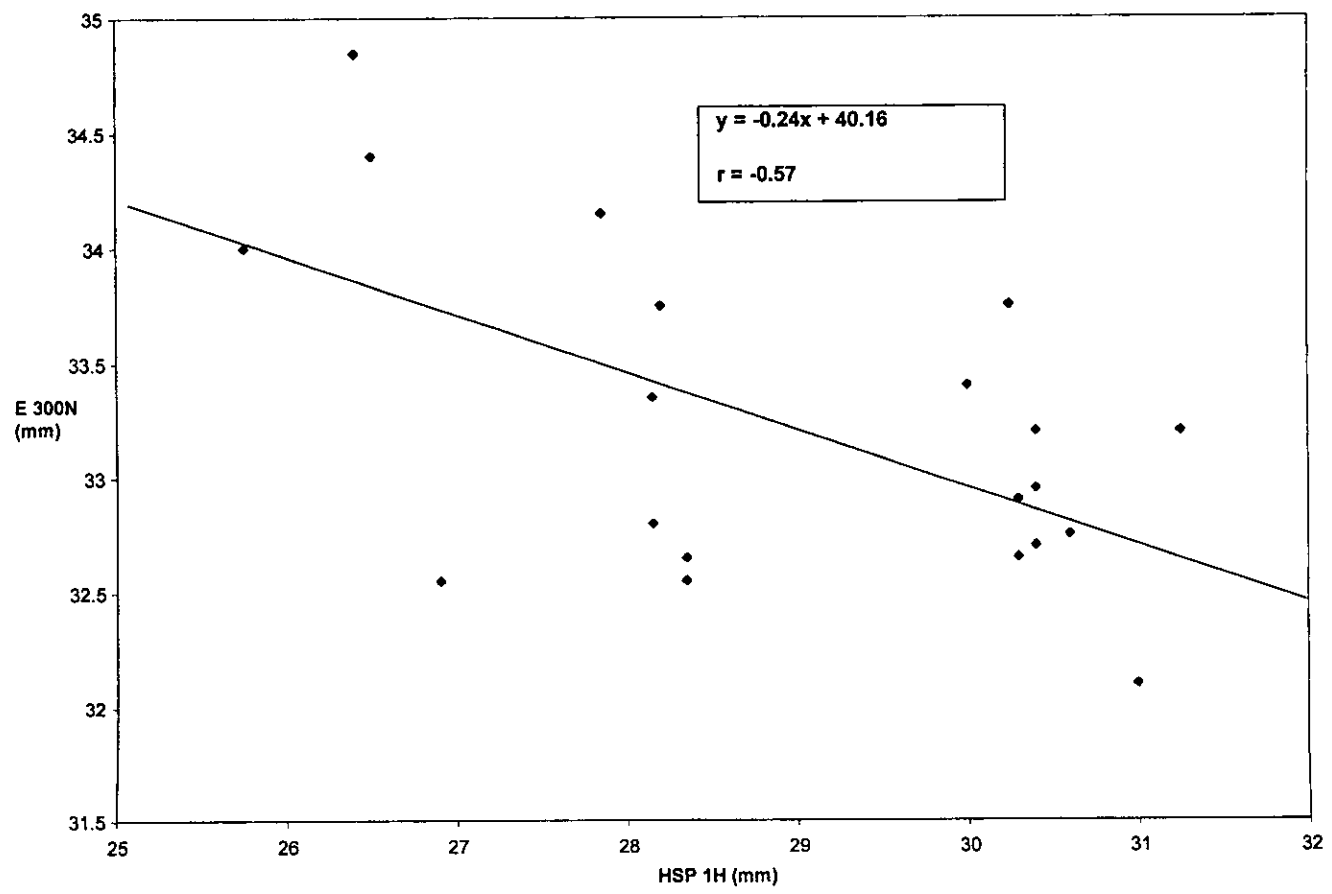


Figura 14: Correlación entre los resultados de E 300N y HSP 1H



estudio ha permitido no obstante el poner en evidencia la no influencia de las causas que se han referido. El examen de otras causas tales como el aireación durante el proceso y el posicionamiento de los picos puede servir para aportar una respuesta.

También hemos observado la importancia de la dispersión debida a la máquina de colado. Esta dispersión es tanto mas importante cuando la cadena de producción no está suficientemente cargada, por lo que se recomienda trabajar en lo posible con líneas de producción cuya configuración presente el mayor número de moldes posibles. En caso de tener que trabajar con una línea poco cargada se sugiere intensificar la vigilancia del proceso.

Una prueba a una temperatura elevada se programará con el objetivo de confirmar el efecto de este factor sobre un periodo mas largo.

5.0 CONCLUSIONES

Conclusiones Generales:

En el curso de este trabajo hemos abordado el problema de identificar las fuentes que generan la variación de los valores de dureza de cojines de poliuretano destinados para su uso en la Industria Automotriz y su posible solución. De esta forma, se ha analizado el problema mencionado en dos cursos de acción complementarios; por un lado, en la primera parte de esta Tesis nos enfocamos al análisis del sistema de medición empleado en las determinaciones de dureza y en la segunda parte encaminamos nuestros estudios al proceso de fabricación de los cojines.

Una vez considerado lo anterior y con base en los resultados obtenidos es posible enunciar las siguientes conclusiones:

1. El sistema de medición de dureza para la determinación del hundimiento (E) de los cojines CAV J64 presenta un valor promedio adecuado de capacidad de medición (3.9).
2. El porcentaje de variación para los resultados de las mediciones de dureza del cojín CAV 948 resultó alto (10.86% en promedio) y por lo consiguiente, la capacidad de medición para este caso presentó un valor bajo (1.6).
3. La mejora aplicada en el proceso de medición de los cojines CAV 948 permitió incrementar la capacidad de medición desde un valor promedio de 1.6 hasta un valor promedio de 4.24, lo cual a su vez motivó una disminución significativa en el porcentaje de variación.
4. Un diseño experimental y el posterior análisis de resultados nos permitió establecer que tanto la temperatura como la humedad relativa del cuarto en donde se efectúan las mediciones influyen significativamente en los valores de dureza obtenidos. De esta forma también se estableció una ecuación de corrección para ajustar los resultados de dureza a las condiciones de temperatura y humedad relativa de referencia.
5. Con respecto al estudio de los diferentes factores involucrados en el proceso de fabricación de los cojines, hemos encontrado que los elementos que presentan mayor influencia sobre la variación de la dureza de los cojines son el molde utilizado, la temperatura del molde y el tipo de vaciado.
6. Las variaciones en los valores de dureza de los cojines debidas al molde utilizado no están relacionadas con factores tales como el engrosamiento del mismo, sus dimensiones o diferencias de temperatura entre los moldes.
7. Los resultados obtenidos nos permiten confirmar las hipótesis planteadas originalmente, así como afirmar que el uso combinado de técnicas estadísticas y herramientas de calidad es de gran utilidad para el análisis y resolución de problemas industriales, por lo que se recomienda la aplicación de los elementos mencionados.

6.0 BIBLIOGRAFÍA

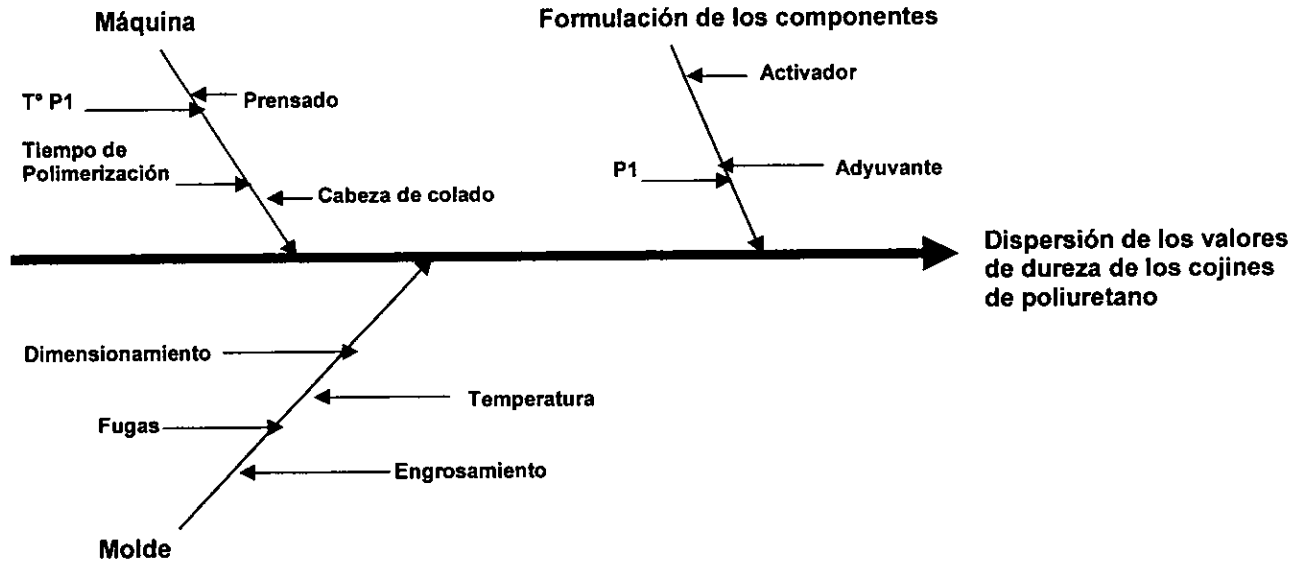
BIBLIOGRAFÍA:

- Brassard, Michael. (1998). *Manual de Herramientas Básicas para el Análisis de Datos, GOAL/QPC*; pp. 9, 14, 24, 51, 69.
- Kume, Hitoshi. (1996). *Herramientas Estadísticas Básicas para el Mejoramiento de la Calidad*. Grupo Editorial Norma; pp. 31-46, 101-144.
- González González, Carlos. (1996). *Calidad Total*. McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V.; pp. 113-115, 137-139.
- Montgomery C., Douglas. (1991). *Diseño y Análisis de Experimentos*. Grupo Editorial Iberoamérica; pp. 1-11, 178-197.
- Johnson R., Robert. (1990). *Estadística Elemental*. Grupo Editorial Iberoamérica; pp. 430-440.
- Elizondo Decanini, Alfonso. (1996). *Manual de Aseguramiento Metrológico Industrial*. Ediciones Castillo S.A. de C.V.; pp. 5-23.
- Nielsen, L.E. y Landel, R.F. (1994). *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. Marcel Dekker Inc.; pp. 362-366.
- Klempner, D. y Frisch, K.C. [Eds.]. (1991). *Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology*. Hanse Publishers; pp. 47-71.
- Mark, H. y Gaylord, N.G. [Eds.]. (1969). *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*; Vol. 11; John Wiley & Sons, Inc.; pp. 558-561.
- Mark, H. [Eds.]. (1990). *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*; Vol. 13; John Wiley & Sons, Inc.; pp. 243-268.
- Driver, W.E. (1991). *Química y Tecnología de los Plásticos*; Compañía Editorial Continental S.A. de C.V.; pp.106-118, 195-197.
- Braun, T., Nauratil, J.D. y Farag, A.B. (1985). *Polyurethane Foam Sorbents in Separation Science*; CRC Press, Inc.; pp. 1-13.
- Doyle, E.N. (1971). *The Development and Use of Polyurethane Products*; McGraw-Hill, Inc.; pp.232-256.
- Rodríguez, F. (1984). *Principios de Sistemas de Polímeros*; Editorial El Manual Moderno, S.A. de C.V.; pp.350-379, 266.
- Petrovic, Z. y Ferguson, J.; Polyurethane elastomers; *Prog. Polym. Sci.*; Vol. 16, No.5; Octubre, 1991; pp. 695-836.
- Lusi, S.H.; Holding the cars of the future together; *Chemtech* ; Vol. 28, No. 6; Junio, 1998; pp. 56-60
- Allison, J.E., et.al.; Advanced materials for automobiles; *Chemtech* ; Vol. 26, No. 11; Noviembre, 1996; pp. 48-60.

- Blair,G.R. and Horn,R.J.; Fleet durability testing of moulded polyurethane foam and competitive automotive cushions; Woodbridge Foam Corporation; www.woodbridgegroup.com/durabili.htm
- Ford, W.T. (1986); *Polymeric Reagents and catalisys*; American Chemical Society; pp. 45-51.
- Box,G. (1988); *Estadística para Investigadores: Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos*; Editorial Reverté; pp. 317-362.
- Winer,B.J. (1992); *Statistical Principles in experimental design*; Editorial McGraw-Hill; pp. 115-128.
- Diamond,W.J. (1989); *Practical experimental designs: For Engineers and Scientists*; Ed. Von Nostrand Reinhold; pp. 63-71.

7.0 ANEXOS

DIAGRAMA CAUSA-EFECTO



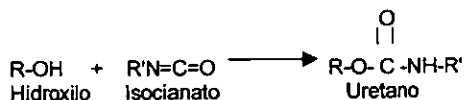
ANEXO 2

Fabricación de espumas flexibles de poliuretano (Driver, 1991; Doyle, 1971; Rodríguez, 1984)

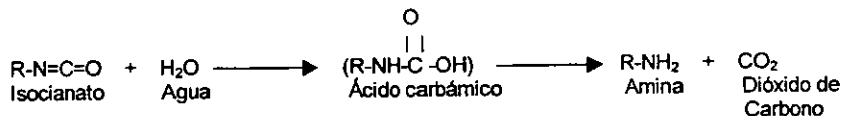
Las espumas flexibles de poliuretano son producidas mediante la adición controlada de un gas expansible durante la reacción de polimerización en la que se forman los enlaces uretano entre alcoholes polifuncionales y poliisocianatos. En la práctica, el alcohol polifuncional, o poli-ol, presenta tres o más centros reactivos hidroxilo, y el poliisocianato es generalmente un diisocianato o un triisocianato, como el diisocianato de tolueno (TDI) o el diisocianato de metilfenilo (MDI).

Las reacciones químicas que se llevan a cabo durante la formación de la espuma de poliuretano son relativamente sencillas. Las reacciones principales involucradas en este proceso son tres:

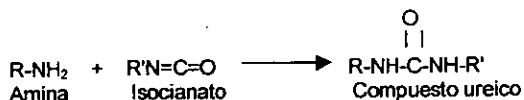
- 1) Reacción entre el isocianato y el hidroxilo para formar uretano.



- 2) Reacción del isocianato con agua, con la generación de un ácido carbámico de transición, para la formación de dióxido de carbono y una amina.



- 3) Reacción de la amina con el isocianato para formar una urea substituida.



La complejidad del proceso de formación de la espuma de poliuretano se incrementa debido a que requiere de un control muy preciso ya que las reacciones específicas descritas anteriormente ocurren en secuencias rápidas y las características del producto final dependen del balance adecuado en la cinética de dichas reacciones.

Durante el desarrollo de las espumas de poliuretano en los años 50's, las espumas flexibles de poliuretano se preparaban a partir de un prepolímero (generado por la reacción del diisocianato con un diol). Este prepolímero tenía un peso molecular cercano a 1000 y comúnmente se incluía un poco de agua en su preparación para incrementar su peso molecular. El prepolímero así formado se hacía reaccionar con agua, utilizando algunas aminas terciarias como catalizadores, para fabricar la espuma de poliuretano.

El proceso de preparación de espumas que involucraba un prepolímero ha sido substituído esencialmente por un proceso de fabricación en el cual el isocianato, el poliol, el agua y otros ingredientes (catalizadores, agentes retardantes de la flama, etc.) de la formulación de la espuma, se mezclan rápidamente y se vierten inmediatamente para la formación de la espuma. Este proceso depende en gran medida de un control preciso de las concentraciones de los componentes de las reacciones y de la secuencia y duración de las mismas.

El control de la secuencia de las reacciones ocurridas durante la fabricación de espumas flexibles se lleva a cabo mediante la selección cuidadosa de la concentración de polioles, surfactantes y el uso de una combinación de aminas terciarias y catalizadores organometálicos. Los polioles, usualmente polioxipropileno que contiene una cantidad minoritaria de polioxietileno, son seleccionados en base a su funcionalidad, su peso molecular y la reactividad de sus grupos hidroxilo. La funcionalidad se toma de acuerdo a la funcionalidad del iniciador empleado en la preparación del poliol; por ejemplo, un poliol que se preparó a partir de glicerina se considera como un triol. Por otro lado el poliol o la mezcla de polioles están caracterizados por un número de hidroxilo, el cual está dado en unidades de miligramos de hidróxido de potasio por gramo del poliol. El número de hidroxilo es igual a:

$$\text{OH} \# = 56100 * (f / M_n)$$

donde f es la funcionalidad del poliol, y M_n es el peso molecular promedio del poliol. Entre mayor sea el número de hidroxilo, el peso molecular promedio del poliol es menor.

Los polioles pueden ser de dos tipos; aquellos que presentan un alto contenido de grupos hidroxilo primarios y aquellos que presentan mayoritariamente grupos hidroxilo secundarios. En general, los polioles con un alto contenido de grupos hidroxilo primarios son los que presentan una mayor reactividad en la formación de poliuretano. Por eso, estos polioles son utilizados para la fabricación de espumas por moldeo, mientras que los polioles con un mayor contenido de grupos hidroxilo secundarios se utilizan para la producción de placas de espuma de poliuretano.

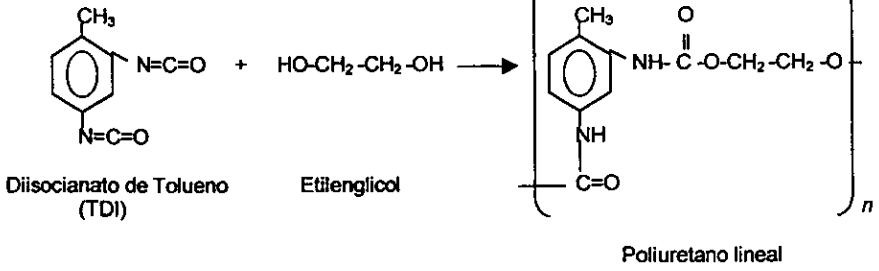
Los surfactantes de silicón son la clase de materiales tensoactivos más empleados en la fabricación de espumas de poliuretano. La adición de estos silicones permite prevenir la ebullición del gas expansible durante la formación de la espuma y favorece una adecuada distribución de dicho gas a través de la matriz polimérica. Además, la adecuada selección de estos materiales permite controlar la estabilidad de la espuma, el tamaño de celda y la distribución del tamaño de celda.

Las aminas terciarias y los catalizadores organometálicos son usados en combinación para la fabricación de espumas de poliuretano. Las aminas terciarias, como la trietilendiamina, actúan como catalizadores de la reacción entre el agua y el isocianato para la formación de dióxido de carbono; mientras que los catalizadores organometálicos, como el dilaurato de dibutilestaño, actúan principalmente sobre la reacción entre el isocianato y los grupos hidroxilo del poliol. En la práctica, se ha observado una sinergia muy fuerte entre las aminas terciarias y los catalizadores organometálicos utilizados para el control de las reacciones de formación de las espumas de poliuretano.

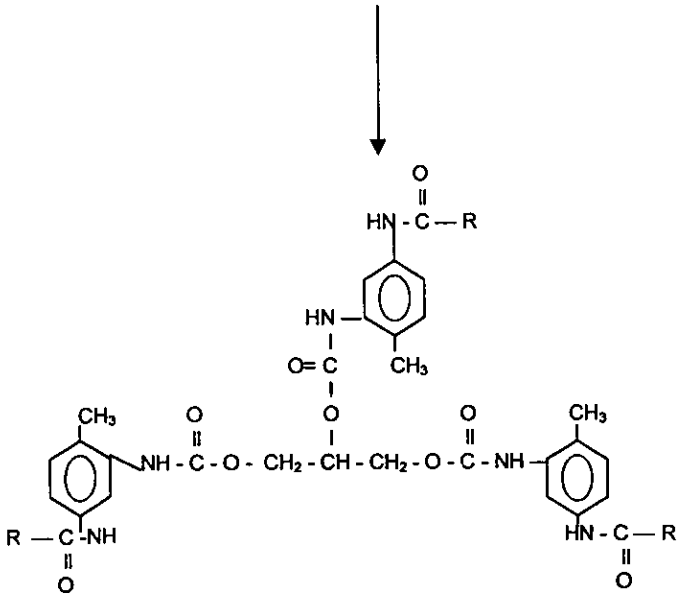
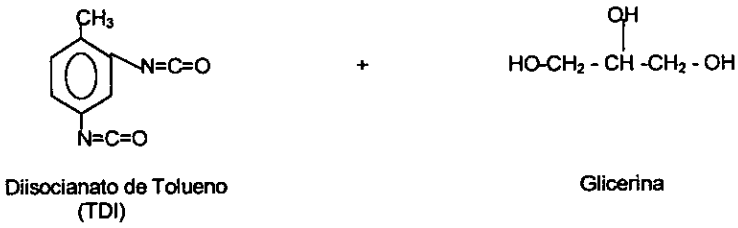
Una formulación típica para la fabricación de una espuma de poliuretano incluye uno o más polioles, diisocianato de tolueno (TDI), agua, agentes surfactantes, un reactivo estabilizador polifuncional de bajo peso molecular y una mezcla balanceada de una amina terciaria y un catalizador organometálico. Un agente auxiliar, que usualmente es un compuesto halocarbonado, puede incluirse para el control de la densidad de la espuma.

Un caso con la descripción citada anteriormente puede observarse en las siguientes reacciones:

①



②



Poliuretano entrecruzado

En la siguiente tabla se presenta una formulación característica para la fabricación de una espuma flexible de poliuretano utilizada en la fabricación de asientos automotrices.

FORMULACIÓN DE INGREDIENTES PARA LA FABRICACIÓN DE UNA ESPUMA FLEXIBLE DE POLIURETANO UTILIZADA EN ASIENTOS AUTOMOTRICES

COMPONENTES	PARTES POR CADA CIENTO PARTES DE POLIOL
Poliol ¹	60
Poliol del polímero ²	40
Dietanolamina	1.25
Agua	4.5
Amina catalizadora ³	0.125
Diazobisciclooctano	0.3
Dilaurato de dibutilestaño	0.01
Surfactante de silicón	1.5
Diisocianato de tolueno (TDI)	50.19

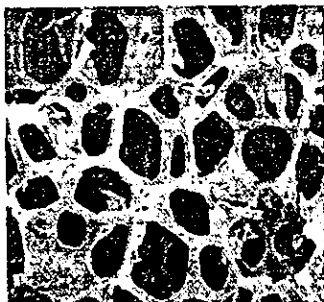
PROPIEDADES DE LA ESPUMA	UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL
Densidad	26.6 kg/m ³
Porosidad	218.4 dm ³ /s/m ²
Elasticidad	66%
Resistencia a la tensión	89.6 kPa
Elongación	107%

¹ Un triol con un número de hidroxilo de 34 mg KOH/g

² Un poliol con un número de hidroxilo de 28 mg KOH/g

³ Amina catalizadora NIAX A-107, vendida por Union Carbide Chemicals and Plastics Co., Inc.

En la siguiente figura podemos observar una muestra de espumas de poliuretano de celda flexible abierta:

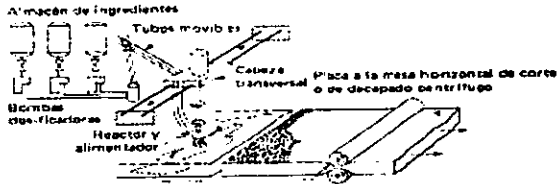


Estructura celular de una espuma de poliuretano de celda flexible abierta

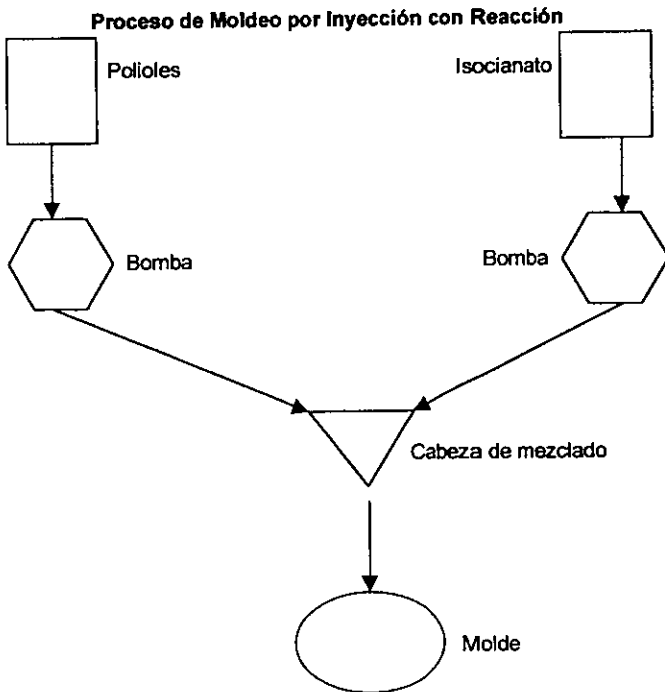
Por otro lado, cabe señalar que las propiedades de las espumas de poliuretano dependen en un alto grado del método de fabricación y de las condiciones del proceso. Para la fabricación de espumas de poliuretano se utilizan principalmente dos procesos: el Moldeo por inyección con reacción (MIR) y la producción continua de placa de poliuretano.

La reacción de espumado tiene lugar tan rápidamente que la producción en gran escala exige equipo automático de mezclado. En el caso de la producción continua de placa de poliuretano se tiene un arreglo en el cual el mezclado y la reacción empiezan en una cabeza viajera que se mueve transversalmente de un lado a otro para formar la placa continua, como lo muestra la siguiente figura:

Producción continua de placa de poliuretano



Por otro lado, la rapidez con la que las reacciones de isocianato-poliol tienen lugar, se ha usado con ventaja en el moldeo por inyección con reacción (MIR). En el proceso típico, se mezclan dos componentes al inyectarlos a alta presión a una cámara especial y después se inyectan casi inmediatamente en un molde cerrado de baja presión. Las partes terminadas pueden ser celulares o sólidas dependiendo de la cantidad de material que se haya inyectado y de la formulación que se use. La necesidad de la industria automotriz de partes de poco peso y acojinadas se satisface con el moldeo por inyección con reacción. En el siguiente diagrama se presenta el proceso MIR.



ANEXO 3

DISEÑO FACTORIAL DE EXPERIMENTOS (Montgomery, 1991 y Johnson, 1990)

Los diseños factoriales son ampliamente utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto conjunto de éstos sobre una respuesta esperada en el desarrollo de tales experimentos. Existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importantes porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación, y porque constituyen la base para otros diseños. Uno de estos diseños es el diseño factorial 2^k , en el que se tienen k factores con dos niveles cada uno.

Los tipos más sencillos de diseños factoriales implican sólo dos factores o conjuntos de tratamientos. Hay a niveles del factor A y b niveles del factor B, dispuestos en un diseño factorial; esto es, cada repetición o réplica del experimento contiene todas las combinaciones de tratamientos ab . En general, hay r repeticiones. En el caso general, sea y_{ijk} la respuesta observada cuando el factor A se encuentra en el i -ésimo nivel ($i = 1, 2, \dots, a$). En general, los datos observados se verán como en la tabla siguiente. El orden en el que se toman las abr observaciones es aleatorio.

Disposición General para un Diseño Bifactorial

		Factor B			
		1	2	...	B
Factor A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11r}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12r}$		$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1br}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21r}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22r}$		$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2br}$
	...				
	a	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1r}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2r}$		$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abr}$

Las observaciones pueden describirse mediante el modelo estadístico lineal:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases}$$

en donde μ es el efecto medio general, τ_i es el efecto del i -ésimo nivel del factor renglón A, β_j es el efecto del j -ésimo nivel del factor columna B; $(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre τ_i y β_j , y ϵ_{ijk} es el componente del error aleatorio.

En un diseño factorial de dos factores, tanto los factores de renglón como de columna tienen la misma importancia. Específicamente el interés consiste en probar hipótesis acerca de la igualdad de los efectos de tratamiento de renglón, es decir:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \text{al menos una } \tau_i \neq 0$$

y de la igualdad de los efectos de tratamiento de columna:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

H_1 : al menos una $\beta_j \neq 0$

También es interesante determinar si los tratamientos de renglón y columna interaccionan.

En otras palabras, resulta conveniente probar:

H_0 : $(\tau\beta)_{ij} = 0$ para toda i, j

H_1 : al menos una $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$

A continuación, se muestra como pueden probarse estas hipótesis usando un análisis de variancia.

Sea $y_{i..}$ el total de observaciones bajo el i -ésimo nivel del factor A; $y_{.j}$ el total de observaciones bajo el j -ésimo nivel del factor B; y_{ij} el total de la observaciones de la ij -ésima celda; además, $y_{...}$ se define como el total general de todas las observaciones. Se definen $\hat{U}_{i..}$, $\hat{U}_{.j}$, \hat{U}_{ij} y $\hat{U}_{...}$ como los promedios de renglón, columna, celda y general, respectivamente. Matemáticamente:

$$y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r y_{ijk} \quad \hat{U}_{i..} = (y_{i..}/br) \quad i = 1, 2, \dots, a$$

$$y_{.j} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^r y_{ijk} \quad \hat{U}_{.j} = (y_{.j}/ar) \quad j = 1, 2, \dots, b$$

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^r y_{ijk} \quad \hat{U}_{ij} = (y_{ij}/r) \quad i = 1, 2, \dots, a$$

$$j = 1, 2, \dots, b$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r y_{ijk} \quad \hat{U}_{...} = (y_{...}/abr)$$

La suma total de cuadrados corregida puede expresarse mediante:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r (y_{ijk} - \hat{U}_{...})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r \{(\hat{U}_{i..} - \hat{U}_{...}) + (\hat{U}_{.j} - \hat{U}_{...}) + (\hat{U}_{ij} - \hat{U}_{i..} - \hat{U}_{.j} + \hat{U}_{...}) + (y_{ijk} - \hat{U}_{ij})\}^2$$

$$= br \sum_{i=1}^a (\hat{U}_{i..} - \hat{U}_{...})^2 + ar \sum_{j=1}^b (\hat{U}_{.j} - \hat{U}_{...})^2 + r \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\hat{U}_{ij} - \hat{U}_{i..} - \hat{U}_{.j} + \hat{U}_{...})^2$$

$$+ \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r (y_{ijk} - \hat{U}_{ij})^2$$

porque los seis productos cruzados del segundo miembro de la ecuación son iguales a cero. Se puede observar que la suma total de cuadrados se ha descompuesto en una suma de cuadrados debida a los "renglones" o al factor A (SS_A), en una suma de cuadrados debida a las "columnas" o al factor B (SS_B), en una suma de cuadrados debida a la interacción entre A y B (SS_{AB}), y en una suma de cuadrados debida al error (SS_E). Analizando el último término del miembro derecho de la

ecuación anterior es posible observar que es necesario tener al menos dos réplicas ($r \geq 2$) para poder obtener la suma de cuadrados del error. Simbólicamente, la ecuación anterior puede expresarse mediante:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E$$

Los grados de libertad asociados a cada suma de cuadrados son:

Efecto	Grados de libertad
A	a - 1
B	b - 1
AB	(a - 1)(b - 1)
Error	ab(r - 1)
Total	abr - 1

Esta descomposición del total de $(abr - 1)$ grados de libertad para las sumas de cuadrados se puede justificar como sigue: los efectos principales de A y B tienen a y b niveles, respectivamente, por lo tanto, tienen a - 1 y b - 1 grados de libertad como se muestra. Los grados de libertad de la interacción simplemente corresponden a los grados de libertad de cada celda (los cuales son iguales a $ab - 1$) menos los grados de libertad de los dos efectos principales A y B; en otras palabras, $[ab - 1 - (a - 1) - (b - 1)] = (a - 1)(b - 1)$. Dentro de cada una de las ab celdas hay $r - 1$ grados de libertad entre las r réplicas, por lo tanto, hay $ab(r - 1)$ grados de libertad del error.

Cada suma de cuadrados dividida entre sus grados de libertad produce una media de cuadrados. Los valores esperados de las medias de cuadrados son:

$$E(MS_A) = E [SS_A / (a - 1)]$$

$$E(MS_B) = E [SS_B / (b - 1)]$$

$$E(MS_{AB}) = E \{SS_{AB} / [(a - 1)(b - 1)]\}$$

$$E(MS_E) = E \{SS_E / [(ab)(r - 1)]\}$$

Si existen diferencias entre los tratamientos de renglón, entonces MS_A será mayor que MS_E . En forma similar, si hay efectos de tratamiento de columna o interacción, las medias de los cuadrados correspondientes serán mayores que MS_E . Por lo tanto, para probar el significado de ambos efectos principales, así como de su interacción, simplemente deben dividirse las medias de los cuadrados correspondientes entre la media de cuadrados del error. Valores grandes de estas razones implican que los datos no concuerdan con las hipótesis nulas.

Si consideramos que los términos del error ϵ_{ijk} son independientes con distribuciones normales con varianza constante σ^2 , entonces las razones de las medias de cuadrados MS_A / MS_E , MS_B / MS_E y MS_{AB} / MS_E tienen distribución F con a - 1, b - 1 y $(a - 1)(b - 1)$ grados de libertad en el numerador respectivamente, y $ab(r - 1)$ grados de libertad en el denominador. Las regiones críticas corresponden al extremo superior de la distribución F .

Es posible obtener las fórmulas para calcular las sumas de cuadrados. La suma total de cuadrados puede calcularse de la manera usual mediante:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r \{(y_{ijk})^2 - [(y_{i..})^2 / abr]\}$$

Las sumas de cuadrados para los efectos principales son:

$$SS_A = \sum_{j=1}^a \{[(y_{.j})^2 / br] - [(y_{..})^2 / abr]\}$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \{[(y_{j.})^2 / ar] - [(y_{..})^2 / abr]\}$$

Para el caso de la interacción es conveniente obtener SS_{AB} en dos etapas. Primero se calcula la suma de cuadrados de las ab celdas, conocida como la suma de cuadrados debido a los "subtotales":

$$SS_{\text{subtotales}} = \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^b \{[(y_{jk})^2 / r] - [(y_{..})^2 / abr]\}$$

Esta suma de cuadrados contiene a la SS_A y SS_B . Por lo tanto la segunda etapa consiste en calcular SS_{AB} mediante:

$$SS_{AB} = SS_{\text{subtotales}} - SS_A - SS_B$$

La suma de cuadrados del error, SS_E , se calcula por diferencia:

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{subtotales}}$$

En la siguiente tabla se representa el análisis de variancia para el modelo bifactorial:

Tabla de análisis de variancia para el modelo bifactorial

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F_0
Factor A	SS_A	$a - 1$	$\{SS_A / (a - 1)\}$	MS_A / MS_E
Factor B	SS_B	$b - 1$	$\{SS_B / (b - 1)\}$	MS_B / MS_E
Interacción AB	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$\{SS_{AB} / [(a - 1)(b - 1)]\}$	MS_{AB} / MS_E
Error	SS_E	$ab(r - 1)$	$\{SS_E / [(ab)(r - 1)]\}$	
Total	SS_T	$abr - 1$		

Por facilidad en los cálculos y la explicación se presentará en este anexo únicamente el primer diseño de la serie 2^k que es aquel que tiene sólo dos factores, A y B, cada uno con dos niveles. Este diseño se conoce como diseño factorial 2^2 y requiere por lo tanto que se realicen sólo $2 \times 2 = 4$ observaciones. Arbitrariamente, los niveles del factor pueden llamarse inferior y superior.

Para ejemplificar el caso del diseño factorial 2^2 consideremos el caso de una investigación que pretende estudiar el efecto que tienen la temperatura y el nivel de agitación sobre la velocidad de una reacción de síntesis orgánica. En este caso la temperatura es nuestro factor A con dos niveles de interés, 25°C y 30°C . El nivel de agitación constituye el factor B, para el cual el nivel inferior corresponde a 60 rpm y el nivel superior corresponde a 80 rpm. Para el desarrollo completo de este diseño requerimos entonces $2 \times 2 = 4$ experimentos, los cuales pueden llevarse a cabo con r repeticiones. En este caso cada experimento se realiza tres veces ($r = 3$), y los datos son como sigue:

ESTA TESIS NO PUEDE
SER REPRODUCIDA

Experimento	Combinación de Tratamientos	A	B	AB	Réplica			Total
					I	II	III	
(1)	A = 25° C B = 60 rpm	-	-	+	28	25	27	80
a	A = 30° C B = 60 rpm	+	-	-	36	32	32	100
b	A = 25° C B = 80 rpm	-	+	-	18	19	23	60
ab	A = 30° C B = 80 rpm	+	+	+	31	30	29	90

En la tabla anterior se presentan las combinaciones de tratamientos para este diseño. Por convención, el efecto de un factor se denota por la letra latina mayúscula. De este modo, "A" se refiere al efecto del factor A, "B" se refiere al efecto del factor B, y "AB" se refiere a la interacción AB. En el diseño 2^2 , los niveles superior e inferior de A y B se denotan por "-" y "+", respectivamente. Las cuatro combinaciones de tratamientos en el diseño suelen representarse por letras minúsculas. En la tabla de referencia se aprecia que el nivel superior de cualquier factor de una combinación de tratamientos está representado por la presencia de la letra minúscula correspondiente, mientras que la ausencia de esta última representa el nivel inferior del factor. Así, a representa la combinación de tratamientos en la que A se encuentra en su nivel superior y B en el inferior; b representa aquella en la que A se halla en el nivel inferior y B en el superior, y ab representa a ambos factores en el nivel superior. Por convención (1) se usa para representar a ambos factores en el nivel inferior.

Una vez que tenemos nuestra tabla de experimentos y los resultados de los experimentos podemos efectuar el análisis del diseño de experimentos. En el ejemplo planteado se hicieron tres réplicas de cada experimento y los resultados individuales de cada réplica son sumados para cada combinación de tratamientos. De esta manera para el caso donde A se encuentra en el nivel inferior y B también, que es el caso de (1), se obtuvieron tres resultados: 28, 25 y 27; y la suma de estos resultados nos da un total de 80. En los cálculos subsecuentes trabajaremos estos totales para cada combinación de tratamientos.

El primer parámetro que se puede calcular para cada factor se conoce como contraste o efecto total. Los contrastes son calculados de la siguiente manera:

$$\text{Contraste}_A = ab + a - b - (1) = 90 + 100 - 60 - 80 = 50$$

$$\text{Contraste}_B = ab + b - a - (1) = 90 + 60 - 100 - 80 = -30$$

$$\text{Contraste}_{AB} = ab + (1) - a - b = 90 + 80 - 100 - 60 = 10$$

Como se puede notar, para el cálculo de los contrastes realizamos la suma algebraica de los valores totales obtenidos, asignándoles para cada combinación de tratamientos el signo positivo o negativo de acuerdo al nivel de factor del cual se está calculando el contraste. Nótese que en el contraste de A, las combinaciones de tratamientos en las que A se encuentra en el nivel superior tienen un signo positivo, mientras que en las combinaciones de tratamientos en las que A se encuentra en su nivel inferior, los valores tienen un signo negativo. Ocurre de igual forma para el caso del contraste de B. Para el cálculo del contraste de la interacción AB, el signo que se asigna a cada valor de las combinaciones de tratamientos es resultado de la multiplicación algebraica de los signos para cada caso. Por ejemplo, cuando A se maneja en el nivel inferior y B también, es decir el caso (1), el signo asignado al valor obtenido para este tratamiento es positivo (+), ya que para este caso el signo para el Factor A es (-) y para el factor B también es (-), por lo que el signo correspondiente es el resultado del producto (-) x (-) que es igual a (+). Se procede de

igual forma para asignar los signos a los valores restantes. Nótese también que el resultado para cada contraste puede ser positivo o negativo según sea el caso.

El segundo parámetro que podemos calcular es el efecto promedio de cada factor, el cual se define como el cambio en la respuesta producida por un cambio en el nivel de ese factor, promediado sobre los niveles del otro factor. La simbología (1), a, b y ab también puede usarse para representar los totales de las r réplicas de las combinaciones de tratamientos correspondientes. Ahora bien, el efecto promedio de A en el nivel inferior de B es $[a - (1)]/r$, mientras que en el nivel superior de B es $[ab - b]/r$. Tomando el promedio de estas dos ecuaciones se obtiene la siguiente expresión:

$$A = (1/2r) \{[ab - b] + [a - (1)]\} = (1/2r) [ab + a - b - (1)]$$

El efecto promedio de B se determina a partir de su efecto en el nivel inferior de A, esto es $[b - (1)]/r$, y de su efecto en el nivel superior de A que es $[ab - a]/r$. Promediando ambas ecuaciones obtenemos:

$$B = (1/2r) \{[ab - a] + [b - (1)]\} = (1/2r) [ab + b - a - (1)]$$

El efecto de la interacción AB se define como la diferencia promedio entre el efecto de A en el nivel superior de B y su efecto en el nivel inferior de B. Así:

$$AB = (1/2r) \{[ab - b] - [a - (1)]\} = (1/2r) \{(1) + ab - a - b\}$$

Una vez que hemos establecido las ecuaciones para calcular los efectos, efectuamos las operaciones correspondientes y obtenemos:

$$\text{Efecto}_A = (1/2r) [ab + a - b - (1)] = \{1/[2(3)]\} (90 + 100 - 60 - 80) = (1/6) (50) = 8.33$$

$$\text{Efecto}_B = (1/2r) [ab + b - a - (1)] = \{1/[2(3)]\} (90 + 60 - 100 - 80) = (1/6) (-30) = -5$$

$$\text{Efecto}_{AB} = (1/2r) \{(1) + ab - a - b\} = \{1/[2(3)]\} (80 + 90 - 100 - 60) = (1/6) (10) = 1.67$$

En este caso el efecto de A (temperatura) es positivo; esto sugiere que elevar A del nivel bajo (25° C) al nivel alto (30° C) incrementará la velocidad de la reacción. El efecto de B (nivel de agitación) es negativo; esto sugiere que elevar el nivel de agitación reducirá la velocidad de la reacción. Al parecer, el efecto de la interacción es pequeño comparado con los dos efectos principales. Para confirmar la interpretación del diseño de experimentos puede emplearse el análisis de variancia. En el diseño 2^k existen algunos métodos rápidos especiales para realizar los cálculos del análisis de variancia. A continuación se presenta el más usual.

Consideremos la suma de cuadrados para A, B y AB. Para ello es posible utilizar los contrastes establecidos en párrafos anteriores. De esta manera tenemos las siguientes expresiones para el cálculo de las sumas de cuadrados:

$$SS_A = (\text{Contraste}_A)^2 / (2^k r) = [ab + a - b - (1)]^2 / (2^k r) = \{(90+100-60-80)^2 / [(2^2)(3)]\} = 208.3$$

$$SS_B = (\text{Contraste}_B)^2 / (2^k r) = [ab + b - a - (1)]^2 / (2^k r) = \{(90+60-100-80)^2 / [(2^2)(3)]\} = 75$$

$$SS_{AB} = (\text{Contraste}_{AB})^2 / (2^k r) = [ab + (1) - a - b]^2 / (2^k r) = \{(90+80-100-60)^2 / [(2^2)(3)]\} = 8.3$$

La suma total de cuadrados se determina de la manera usual mediante la expresión:

$$SS_T = \sum(y_i^2) - [(\sum y_i)^2 / (2^k r)]$$

por lo que,

$$SS_T = (28^2 + 25^2 + 27^2 + 36^2 + 32^2 + 32^2 + 18^2 + 19^2 + 23^2 + 31^2 + 30^2 + 29^2) - (330^2/12)$$

$$SS_T = (9398) - (9075) = 323$$

En general SS_T tiene $[(2^k r) - 1]$ grados de libertad. La suma de cuadrados del error, con $[2^k(r-1)]$ grados de libertad, se puede calcular por diferencia, mediante:

$$SS_E = SS_T - (SS_A + SS_B + SS_{AB}) = 323 - (208.3 + 75 + 8.3) = 31.4$$

Una vez efectuado el cálculo de las sumas de cuadrados se construye la tabla de análisis de variancia. En este caso la tabla de variancia es la siguiente:

Tabla de Análisis de Variancia

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F ₀
A	208.3	1	208.3	53.15
B	75.0	1	75.0	19.13
AB	8.3	1	8.3	2.13
Error	31.4	8	3.92	
Total	323.0	11		

Analizando la tabla de variancia anterior se puede establecer que ambos efectos principales son significativos al 1%, ya que el valor obtenido de tablas para $F_{critica} = 11.3$ a este nivel. Por otro lado, el efecto de la interacción no es significativo con este nivel.

Para el ejemplo desarrollado en este anexo, el modelo de regresión es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 AB$$

donde,

$$\beta_0 = (\sum y_i) / (2^k r) = (330) / (12) = 27.5$$

$$\beta_1 = \text{Efecto}_A / 2 = 8.33 / 2 = 4.16$$

$$\beta_2 = \text{Efecto}_B / 2 = -5 / 2 = -2.5$$

$$\beta_3 = \text{Efecto}_{AB} / 2 = 1.67 / 2 = 0.83$$

De esta forma, el modelo de regresión para este caso es:

$$y = 27.5 + 4.16A - 2.5B + 0.83AB$$

Sin embargo, si tomamos en cuenta los resultados de la tabla de análisis de variancia podemos eliminar un término de la ecuación anterior, ya que la interacción AB no es significativa. Así, el modelo de regresión queda como sigue:

$$y = 27.5 + 4.16A - 2.5B$$

Los demás diseños factoriales incluidos en la serie 2^a se resuelven de manera similar a la presentada en este anexo, con las consideraciones apropiadas para cada caso.