

OPTIMAN

Diseño del Proyecto Piloto

Nº Expediente: IMDECA/2015/82

PROGRAMA: PROYECTOS DE I+D EN COLABORACIÓN

ACTUACIÓN: IMDECA-Proyectos de I+D en colaboración

Fecha de concesión: 23 de octubre de 2015

Entregable 5.1 (E5.1)

Diseño del Proyecto Piloto

Perteneciente al paquete de trabajo: PT5

Participante responsable: AIMPLAS

Mes estimado de entrega: 24

Tabla de Contenidos

1. Glosario de términos	4
2. Introducción	5
2.1. <i>Objetivos del paquete de trabajo PT5</i>	5
2.2. <i>Objetivo del presente documento (E3.1)</i>	5
3. Descripción del Proyecto Piloto	5
3.1. <i>Metodología</i>	6
3.2. <i>Métricas</i>	6
3.3. <i>Diseño de experimentos</i>	7
4. Caso de uso “Optimización del proceso en la inyección de plástico”	11
4.1. <i>Descripción del experimento</i>	11
4.1.1. Resumen del proceso de fabricación (en nuestro caso un breve resumen del proceso de inyección)	11
4.1.2. Descripción de pieza/producto demostrador (en nuestro caso el llavero)	13
4.1.3. Descripción de la configuración de la máquina (en nuestro caso la Engel) y equipamiento auxiliar empleado, incluyendo el equipo de medición de consumos.	13
4.1.4. Detalle materiales (descripción del material plástico)	18
4.2. <i>Desarrollo del experimento</i>	19
4.1.1. Identificación de los principales parámetros de control de proceso (breve resumen).	19
4.1.2. Selección final de parámetros para el DOE y justificación del uso de los mismos	21
4.1.3. Descripción del DOE (tabla con experimental y codificación)	21
4.1.4. Metodología de desarrollo y ejecución del experimental (incluyendo; ajuste inicial de máquina, sistemática para variación de parámetros, sistemática para toma de datos y posterior registro de resultados para envío a ITI).	22
5. Caso de uso “Centro de mecanizado de multicomponentes de calzado”	24
5.1. <i>Descripción del experimento</i>	24
5.1.1. Resumen del proceso de fabricación	24
5.1.2. Descripción de pieza/producto demostrador	26
5.1.3. Descripción de la configuración de la máquina y equipamiento auxiliar empleado, incluyendo el equipo de medición de consumos.	27
5.1.4. Detalle materiales.	31
5.2. <i>Desarrollo del experimento</i>	34

5.2.1	Identificación de los principales parámetros de control de proceso.....	34
5.2.2	Selección final de parámetros para el DOE y justificación del uso de los mismos.....	34
5.2.3	Descripción del DOE (tabla con experimental y codificación).....	34
5.2.4	Metodología de desarrollo y ejecución del experimental (incluyendo; ajuste inicial de máquina, sistemática para variación de parámetros, sistemática para toma de datos y posterior registro de resultados para envío a ITI).	35

1. Glosario de términos

En el presente documento se utilizará algunos conceptos que deben ser definidos con anterioridad a su lectura para aclarar ambigüedades y facilitar el entendimiento.

- **Fabrica del Futuro (FoF):** Fábrica inteligente capaz de adaptar el proceso productivo a las necesidades de producción haciendo uso de las nuevas tecnologías a fin de aumentar la eficiencia, la calidad y reducir el impacto medioambiental.
- **Big data:** Conjunto de tecnologías que permiten el manejo de grandes volúmenes de datos que no pueden ser tratados con las tecnologías convencionales.
- **Machine Learning:** Conjunto de técnicas que permiten crear algoritmos capaces de generalizar comportamientos a partir de información no estructurada.
- **Tarugo:** Horma de grandes dimensiones, que tiene mucho material sobrante y que aún no se ha mecanizado y que no se puede utilizar para hacer un zapato. A partir de este tarugo se fabrican las hormas que se van a utilizar

2. Introducción

2.1. Objetivos del paquete de trabajo PT5

El objetivo del paquete de trabajo se centra en el diseño y planificación de un Proyecto Piloto que contemple la ejecución de dos casos de uso que permitan validar el sistema de optimización predictiva (PT4) y el de redes de producción (PT5).

2.2. Objetivo del presente documento (E3.1)

El objetivo del presente documento es la descripción del alcance y plan de trabajo del proyecto piloto. En concreto, estará centrado en los dos casos de usos contemplados en el proyecto:

1. **Caso de Uso “Centro de mecanizado de multicomponentes de calzado”:** Caso de uso centrado en la validación del sistema predictivo de control de calidad de las piezas finales de un *centro de mecanizado de multicomponentes de calzado* (hormas, tacones, plantillas). Será necesario la sensorización del sistema, captación de datos y optimización del consumo energético de la producción con control.
2. **Caso de Uso “Optimización del proceso en la inyección de plástico”:** Caso de uso centrado en la validación del calibrado de una máquina de inyección de plástico con el objetivo de predecir el conjunto de parámetros de fabricación que permitan una gestión óptima de la energía con criterios de calidad en la fabricación de las piezas de plástico. Además, mediante la escucha de la sensorización de la máquina, será posible validar las

3. Descripción del Proyecto Piloto

Un proyecto piloto, por definición, comprende un experimento a pequeña escala ejecutado con la finalidad de valorar la factibilidad, los costes, los efectos adversos, las estrategias de producción, y la validación conceptual de una potencial innovación, antes de comprometerse con la realización de la fase de explotación de resultados. De acuerdo a la planificación general del proyecto se planteó la realización de un **proyecto piloto** con el siguiente objetivo:

“Validar el *Sistema de Gestión Inteligente (SGI)* como infraestructura de soporte la incorporación a la *Fábrica del Futuro* a las empresas de los sectores industriales del plástico y del calzado”

Como sabemos, el objetivo principal del proyecto es la aplicación de técnicas y tecnologías, en el dominio de Big Data, Cloud Computing, Machine Learning y Business Intelligence permitan potenciar capacidades y mejorar la competitividad a las empresas pertenecientes a los sectores citados. En tal sentido, el piloto ha sido concebido con la finalidad de probar el funcionamiento del prototipo generado y extraer las conclusiones que permitan generalizar la solución en un potencial mercado.

Específicamente, el proyecto piloto persigue **evaluar el prototipo del Sistema de Gestión Inteligente en los entornos controlados que permitan simular empresas del sector del calzado y del plástico.**

3.1. Metodología

Durante diseño del proyecto piloto se trabajó, fundamentalmente, en dos **casos de uso** centrados en supervisión de los procesos de fabricación con el objetivo de detectar anomalías de funcionamiento y en la optimización de los parámetros de configuración para reducir el consumo y aumentar la calidad del producto final.

En concreto, los procesos de fabricación que permitirán validar el funcionamiento del conjunto total de elementos que componen el Sistema de Gestión Inteligente (SGI) en un entorno cercano al real son:

1. Experimentar con el proceso de fabricar una **horma de zapatos** a partir de un tarugo de plástico. Para ello, se utilizará la fresadora de INESCOP y se procederá a medir las señales de vibración y de consumo con el objetivo de detectar anomalías de funcionamiento. Se utilizará el simulador para predecir el consumo atendiendo a los parámetros iniciales del mecanizado.
2. Implementar un proceso de tirada larga a través de la fabricación de muchas **llaves de plástico** gracias a la inyectora de AIMPLAS. Se procederá a parametrizar el mecanizado con el simulador para acortar los tiempos de preparación y así ahorrar costes. Además, será necesario detectar anomalías de los indicadores de calidad de cada una de las piezas.

3.2. Métricas

La ejecución de un proyecto piloto tiene implícitas tareas de seguimiento y evaluación de los resultados obtenidos. Cada piloto, en función de los objetivos marcados, necesitará definir un conjunto de métricas que le permitan realizar a posteriori un análisis objetivo de los resultados y obtener unas conclusiones.

Las características de dichas métricas deben ser:

- Simples y definidas de forma precisa, de forma que se puedan evaluar sin ambigüedades.
- Objetivas, evitando la subjetividad en su cuantificación.
- Fácilmente obtenibles, esto es, con un esfuerzo razonable.
- Válidas. Deben medir lo que se intenta medir.
- Fiables. Deben ofrecer el mismo resultado para diferentes evaluadores.

Para la identificación de estas métricas, se han tenido en cuenta un conjunto de criterios, mediante los cuales se pretende llevar a cabo el seguimiento del proyecto piloto:

Criterios para la evaluación del piloto	
Complejidad	Debe evaluarse el mayor número de funcionalidades aportadas por el SGI: cómo han sido percibidas por los usuarios, utilidad de las mismas, posibles mejoras, expectativas, etc.
Explotación	Debe evaluarse, para las personas que participen en el proyecto piloto, las perspectivas de explotación que supone el desarrollo del proyecto
Transferencia	Debe evaluarse cómo los resultados del proyecto pueden ayudar a conseguir una mejora de los procesos de fabricación de las empresas de los sectores del calzado y del plástico, tanto en la identificación y explotación de oportunidades de negocio, como en la generación de redes empresariales.
Investigación e innovación tecnológica	Debe evaluarse el grado de innovación real alcanzado a través del proyecto, tanto desde el punto de vista de innovación tecnológica como de innovación empresarial.
Impacto	Debe determinarse el impacto potencial que puede proporcionar la solución generada, a través del impacto obtenido mediante la realización del piloto, y que se traducirá en el número de potenciales beneficiarios de la solución.

3.3. Diseño de experimentos

Como paso previo a la ejecución del piloto, se llevó a cabo un diseño de experimentos para poder obtener datos de funcionamiento de los mecanizados en un contexto controlado. Este proceso es necesario para poder modelar el Motor de Correlación de Datos con los históricos de funcionamiento de las piezas que se fabricarán en el piloto.

El diseño de experimentos consistió en indicar un conjunto de pruebas a realizar dentro del alcance del piloto, es decir, especificar los valores de los parámetros deben configurarse en los mecanizados para fabricar la horma de zapatos y la llave de plástico, para facilitar la construcción del Motor de Correlación de Datos.

3.3.1 Justificación técnica del diseño de experimentos

Uno de los problemas planteados en el proyecto, consiste en obtener los parámetros de funcionamiento de una máquina que permitan la optimización de una serie de objetivos finales como pueden ser la calidad, energía, etc...

Este proceso de optimización pasa por el aprendizaje de una función objetivo que permita la predicción de las variables de interés a partir de los parámetros de funcionamiento de una máquina.

El formato máximo de la función a estimar, suponiendo un modelo cuadrático:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \sum_{\substack{i,j \leq n \\ i,j \geq 1}} \beta_{ij} X_i X_j + \dots + \beta_1 X_1^2 + \dots + \beta_n X_n^2$$

Donde Y representaría nuestro valor objetivo o multiobjetivo (consumo, calidad, etc). Los valores β_i serán los parámetros del modelo a estimar, y las variables X_i representan los diferentes parámetros de la máquina, sobre los que se puede actuar, para conseguir un objetivo deseado.

Una vez estimado el modelo, que permite explicar la relación existente entre el objetivo perseguido y los parámetros que definen a la máquina, se estará en disposición de optimizar automáticamente la máquina para un objetivo dado, e incluso imponer restricciones a los diferentes parámetros y relaciones entre parámetros.

Para poder realizar dicha estimación se requiere de un conjunto de datos que muestren los valores de Y obtenidos al imponer determinados valores (X_1, \dots, X_n) , suponiendo que la máquina dispone de n parámetros configurables. A partir de estos datos el modelo aprenderá las relaciones existentes entre los objetivos y los parámetros dando valores concretos a los diferentes valores β_i .

Así pues, previo a la estimación del modelo debemos disponer de m muestras con n dimensiones cada una, una dimensión por cada parámetro de la máquina, representados en una matriz de mediciones que podemos representar en una matriz X para los parámetros. Y de una matriz Y por cada valor objetivo observado, con m valores, uno por cada medición realizada, conforme se muestra a continuación.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn}^2 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}$$

Ahora la cuestión consiste en conseguir las m mediciones necesarias, para poder realizar la estimación del modelo anteriormente mencionado. Además interesará establecer los valores ideales a probar para cada una de los parámetros y que este valor m esté acotado y no sea excesivamente grande, pues su valor informa sobre el número de experimentos a realizar en la toma de datos. Es aquí donde el Diseño de Experimentos va a jugar un papel relevante.

3.3.2 Especificación de los experimentos

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, para poder establecer la función que relaciona los objetivos perseguidos con los parámetros de funcionamiento, se requiere experimentar. La experimentación consiste en tomar una serie de muestras, en el que los parámetros de funcionamiento de la máquina tienen unos valores determinados y donde, para cada una de las muestras, se anota el valor que toma la variable objetivo tras la prueba. Tanto el número m de pruebas o tratamientos a realizar como los valores de los parámetros en cada una de éstas, se estiman durante la fase del diseño de experimentos.

Para entender bien el objetivo perseguido en el diseño de un experimento se han de definir una serie de conceptos previos. Así, se define **factor** como todo aquel parámetro modificable sobre el objeto de estudio, por ejemplo la velocidad de rotación sería un factor modificable, no así el grado de humedad externa en la ubicación de la fábrica. Se define **nivel** como uno de los valores impuestos a un parámetro en las pruebas. Cada factor se prueba con un número de niveles preestablecido según el objetivo perseguido. Así si lo que se quiere es realizar el estudio de la relación lineal entre un factor y el valor objetivo perseguido, se establecerá un mínimo de dos niveles para el factor, pues dos puntos representan una línea. Sin embargo, si lo que se quiere es estudiar la relación cuadrática, entre un factor y el valor objetivo, necesitaremos un mínimo de tres niveles para el factor, y así sucesivamente. Se ha de tener en cuenta que es muy recomendable que los niveles dentro de un factor estén *equiespaciados*. Así, si se quiere trabajar con tres niveles lo recomendable sería, un nivel bajo al que impondríamos un valor mínimo razonable del parámetro, un nivel bajo con un nivel máximo razonable y un nivel intermedio calculado como el punto medio entre el nivel bajo y el nivel alto.

Entendemos como **diseño de experimentos completo**, aquel que realiza todas las posibles combinaciones de niveles con todos los parámetros en estudio a los niveles establecidos. Así imaginemos un experimento en el que se quiere 10 parámetros a 3 niveles. Un diseño de experimentos completo en estas circunstancias supondría un total de $3^{10}=59049$ pruebas. Esto supondría, que antes de poder comenzar a estimar el modelo, debería de hacer funcionar la máquina 59049 veces, variando los valores para los 10 parámetros en cada ocasión.

A la vista de la problemática planteada, parece natural pensar en una reducción drástica de la experimentación, si se actúa de manera independiente y en orden sobre cada uno de los parámetros, así se experimentaría primero con los tres niveles del primer parámetro y se elige el mejor nivel. Una vez elegido el nivel de éste se fija y se experimenta con los tres niveles del segundo parámetro, eligiendo aquel nivel para este segundo parámetro que produce un mejor objetivo y así sucesivamente. Actuando de esta manera tan sólo se requeriría un total de 30 pruebas.

Destacar que sobre todo aquello que no probado no se podrá averiguar su influencia estadística. Aquí cabe preguntarse sobre si el comportamiento de la variable objetivo será el mismo, desde el punto de vista del primer parámetro, si se impone un nivel alto del primer parámetro y uno bajo del segundo que si se impone uno alto del primer parámetro y uno alto del segundo, esto es lo que se conoce como **interacción** ($X_i X_j$). Esta cuestión no tendrá respuesta, si sobre cada uno de los parámetros, operamos de manera independiente (aislada), pues la influencia de las interacciones, sobre el valor de la variable objetivo, no se habrán medido en ningún momento.

Así pues, debemos de encontrar un compromiso entre el mejor caso, que supone un diseño de experimentos completo y el peor caso que supone un diseño de experimentos independiente para cada uno de los parámetros implicados.

Para ello el diseño de experimentos se encargará: o bien de encontrar el mínimo número de pruebas necesarias que garanticen una buena aproximación al primer caso, sin tener que realizar por ello las 3^{10} pruebas, eligiendo para ello, las mejores pruebas de entre todas las posibles, o bien a partir de un número máximo de pruebas, ofrecido como parámetro, encontrar las mejoras junto a un valor de similitud de éste experimento con el completo que nos informará sobre la proximidad de éste con el diseño completo.

Para ello el diseño de experimentos parte del hecho de que a cada una de las i pruebas del experimento le corresponde un valor x_{ij} . Así pues, sea \mathbf{X} , la matriz con \mathbf{m} filas, que representa las \mathbf{m} pruebas en un diseño completo, y \mathbf{s} columnas con los valores para cada uno de los parámetros y relaciones entre parámetros implicados en el estudio. Y sea el vector columna \mathbf{y} que contendrá \mathbf{m} filas una correspondiente a cada experimento realizado. De acuerdo a la teoría de los modelos de Regresión Lineal, el estimador \mathbf{b} óptimo del vector $\boldsymbol{\beta}$ de parámetros del modelo planteado viene dado por:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^t \mathbf{y}$$

Así los puntos del diseño se escogen para que esta estimación estadística de \mathbf{b} sea lo mejor posible.

Para ello siendo σ^2 la varianza residual del modelo planteado, la matriz de varianzas-covarianzas de las \mathbf{b} , se calcula como:

$$V_b = (\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} \sigma^2$$

Donde se muestra claramente que su valor depende de los puntos elegidos en el diseño $(\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1}$. Así pues, el Diseño de Experimentos planteado selecciona aquellos puntos que minimizan la varianza V_b , haciendo que la estimación \mathbf{b} sea lo más precisa posible (D-Optimalidad), eligiendo para ello, aquellos valores de \mathbf{X} hacen mínima la matriz $(\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1}$ haciendo para ello mínimo $\det [(\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1}]$.

Además a partir del valor de D-Optimalidad de nuestro experimento, con un número de muestras preestablecido, respecto de dicho valor en un experimento completo, podremos conocer el grado de aproximación del propuesto respecto del diseño de experimentos completo.

Caso de uso AIMPLAS

En este caso de uso, la máquina dispone de un total de 12 parámetros, que queremos modelar hasta un nivel cuadrático para todos los factores. Esto conlleva experimentar cada factor con 3 niveles.

- B: Nivel bajo del factor (mínimo razonable).
- M: Nivel medio $(A + B)/2$
- A: Nivel alto del factor (máximo razonable).

El nivel medio ha de ser equidistante al resto por lo que se calcula como el punto medio entre ambos.

Aquí un diseño completo supondría la realización de $3^{12}=531441$ pruebas. Es por ello que inicialmente se ha planteado un experimento con 100 pruebas y se ha aplicado la selección de las pruebas a realizar en cada tratamiento, aplicando para ello los criterios comentados en el anterior apartado.

Caso de uso INESCOP

En el caso de uso de INESCOP tan sólo se dispone de dos parámetros a optimizar por lo que aquí se plantea utilizar 4 niveles para cada uno de los dos parámetros, lo que produciría un total de $2^4=16$ pruebas en un diseño de experimentos completo.

En este caso los 4 niveles son:

- A: Nivel bajo del factor (mínimo razonable).
- B: Nivel medio bajo del factor $A + (D - A)/3$.
- C: Nivel medio alto del factor $A + 2 \times (D - A)/3$
- D: Nivel alto del factor (máximo razonable).

En este caso se han utilizado 4 niveles en lugar de 3 para conseguir más muestras, que o bien permitan una mayor significación estadística o bien incrementar la complejidad del modelo máximo a estimar.

4. Caso de uso “Optimización del proceso en la inyección de plástico”

4.1. Descripción del experimento

7.1.1 Resumen del proceso de fabricación (en nuestro caso un breve resumen del proceso de inyección).

En este apartado se describe de forma genérica el proceso de inyección de plásticos. El ciclo de producción consta de ocho fases:

3. **Cierre del molde:** Cuando se produce el cierre del molde después de la expulsión de la pieza anterior, el ciclo vuelve a empezar.
4. **Avance del grupo de inyección:** La unidad de inyección avanza hasta que la punta de la boquilla toca con el molde que se encuentra cerrado y da el consentimiento para la inyección.
5. **Inyección del material en el molde, cerrado y frío:** En este punto se realiza el llenado del molde con el material plastificado. Para realizar el llenado el husillo ejerce una presión de inyección sobre el material. De esta manera el material va saliendo por la boquilla del cilindro y se va introduciendo en el molde. Este proceso se realizara a una cierta velocidad dependiendo de las dimensiones de la pieza a inyectar. El llenado debe ser equilibrado para que el material se distribuya de forma uniforme por todo el molde.

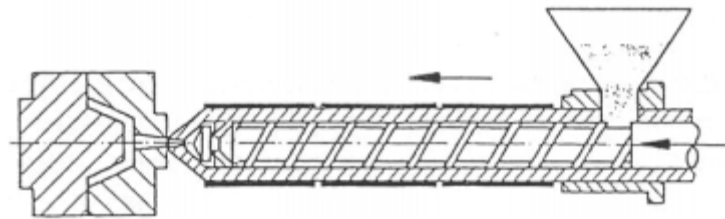


Imagen 1: inyección del material

6. **Mantenimiento de la presión:** Una vez ya se ha llenado el molde, se continúa ejerciendo presión sobre el material para compactar la pieza y que copie bien las paredes del molde. Esta presión tiene que ser menor que la de inyección y se debe controlar para que no sea ni muy elevada ni muy baja porque puede crear defectos en la pieza.
7. **Refrigeración y solidificación de la pieza:** Comienza al terminar la inyección y dura hasta que empieza la apertura del molde. Es el apartado de la inyección en el que más tiempo se invierte. Se puede observar en la imagen adjunta.

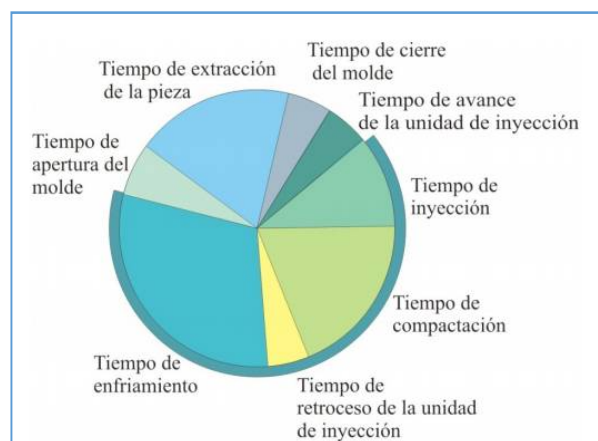


Imagen 2: distribución de los tiempos del ciclo

8. **Retroceso del grupo de inyección:** La unidad de inyección retrocede y da el consentimiento para que se abra el molde.
9. **Plastificación del material para el ciclo siguiente:** Este proceso ocurre paralelamente con el enfriamiento de la pieza. La plastificación consiste en la fusión y homogenización del polímero para que pueda ser inyectado, pero sin llegar a degradarlo. El calentamiento se produce por la rotación del husillo, que transforma parte de la energía mecánica en calor por fricción, y además las paredes calientes del cilindro contribuyen a aumentar la temperatura por conducción. La temperatura que se aplica al polímero depende del tipo de material, de la carrera de plastificación y del tiempo de residencia del material dentro del husillo. Una vez plastificado, el material se queda en la punta del cilindro a la espera de ser inyectado. No todo el material que reside al inicio a las puertas de la boquilla es inyectado, sino que existe una cierta cantidad que se queda acumulada, llamado cojín. Durante este proceso el material plastificado que se va acumulando en la punta del cilindro ejerce presión sobre el husillo, lo que hace que este retroceda. Para evitar esto se aplica una contrapresión sobre el husillo.

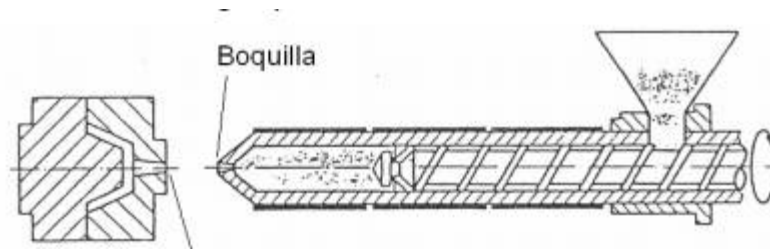


Imagen 3: plastificación

10. **Apertura del molde y expulsión de la pieza:** En resumen, el proceso consiste en hacer pasar a presión el material termoplástico fundido, desde un cilindro caliente, a las mitades de un molde que se mantienen cerradas. Después de un periodo adecuado de enfriamiento, las dos mitades del molde se separan y la pieza formada es liberada y expulsada.



Imagen 4: Diagrama del ciclo de inyección

7.1.2 Descripción de pieza/producto demostrador (en nuestro caso el llavero).

La pieza que se va a inyectar en este experimental es un llavero con el logotipo de AIMPLAS. Las dimensiones que tiene la pieza son, espesor de 2'3 mm, longitud de 54'4mm, ancho superior de 24'4mm y ancho inferior de 15'5mm.



Imagen 5: Producto demostrador

7.1.3 Descripción de la configuración de la máquina (en nuestro caso la Engel) y equipamiento auxiliar empleado, incluyendo el equipo de medición de consumos.

La máquina utilizada para la realización del experimental ha sido la inyectora Engel Victory 50. Se trata de una inyectora de 50 toneladas con un diámetro de husillo de 25mm.



Imagen 6: Máquina inyectora Engel Victory 50

La capacidad de inyección que tiene, es decir, la cantidad máxima de material que la máquina puede inyectar de una sola vez es de 69 cm^3 y la presión máxima que puede ejercer es de 2090 bar. La capacidad de inyección viene determinada por el diámetro y la carrera del husillo de inyección, así como por el tipo de molde utilizado, la temperatura que alcanza el polímero fundido, la presión a la que se inyecta y otras variables

ENGEL

HOJA DE DATOS / Fichas TÉCNICAS						
SCHWERTBERG AUSTRIA		SD-Nr.:	204169			
		angelegt am :	08.10.2015 14:54			
		letzte Aenderung:	08.10.2015 14:54			
DENOMINACIÓN MAQUINA:		VC 200/50 TECH				
1) Unidad de Cierre						
De sujeción / Fuerza de sujeción	kN	500				
Carrera Apertura	mm	408				
Eyector / carrera eyector	mm	100				
Eyector / fuerza del eyector	kN	39,8				
2) Unidad						
Alimentación de la unidad de accionamiento de potencia / Bomba	kW	0				
3.1) 1 Unidad de Inyección						
Diámetro de husillo	mm	22	25	30	35	
Max. Volumen del Cilindro	cm ³	53	69	99	135	
Max. Capacidad Husillo (PS)	gr	55,7	72,5	104,0	141,8	
Velocidad Maxima del Husillo	r/min	480	480	480	480	
Velocidad Maxima del Husillo actual	r/min	480				
Caudal de Inyección / Velocidad de Inyección	cm ³ /s	78	100	145	197	
Inyección de Corriente Aumentada / Tasa de Inyección Mayor	cm ³ /s	51	66	95	129	
Presión Inyección	bar	2402	2090	1451	1066	
Presión Inyección Aumentada	bar	2402	2404	2205	1620	
Carrera Boquilla	mm	230				
Fuerza Apollo Boquilla	kN	28,3				

Imagen 7: Datos técnicos de la inyectora Engel

Esta inyectora se compone de dos sistemas principales, tal y como se puede observar en la imagen adjunta, la unidad de inyección y la unidad de cierre.

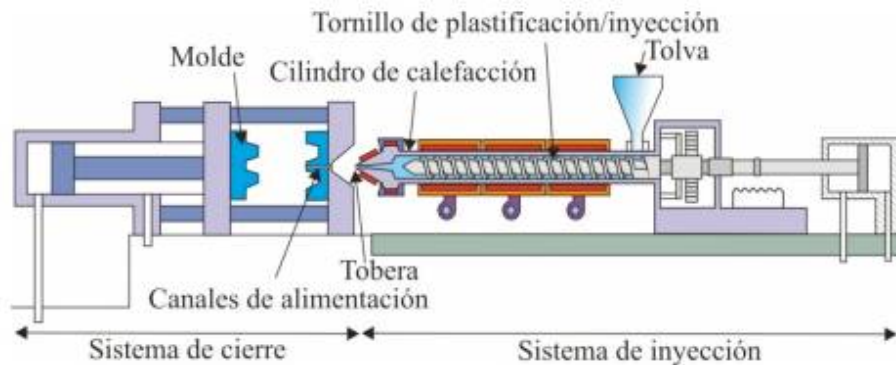


Imagen 7: Unidades de la máquina de inyección

El sistema de inyección abarca el dispositivo de aportación de material, los elementos mecánicos para la plastificación del mismo y el accionamiento del émbolo inyector.

El sistema de cierre efectúa los movimientos de apertura y cierre del molde de inyección.

El tipo de construcción que presenta es horizontal. En él las unidades de inyección y cierre trabajan horizontalmente en alineación axial.

Permite un trabajo con tres formas de funcionamiento: manual, semiautomático y automático. En el trabajo manual todas las funciones son dirigidas por el personal de servicio. En el trabajo semiautomático, un impulso de mando dispara el ciclo total de trabajo; la duración de las diversas funciones queda determinado por impulsos de relés de conexión regulables. En funcionamiento automático, un impulso de mando introduce el ciclo de trabajo, que se repite entonces automáticamente. El cambio de una forma de trabajo a otra se efectúa generalmente mediante conmutador.

Equipamiento Periférico:

Para la realización del experimental es necesario el uso de equipamiento periférico a parte de la máquina inyectora. Uno de ellos es el deshumificador, el cual se utiliza para secar el material y el otro es el analizador de redes, el cual se encarga de medir los consumos eléctricos durante el experimental

- El secador-deshumificador de granza:

Procesar muchos materiales con exceso de humedad puede dar lugar a diversos defectos en la producción de las piezas terminadas. Estos defectos pueden ser tanto visuales como funcionales.

En el caso del material que se está utilizando en este experimental como es higroscópico, es decir tienen mucha afinidad por el agua, absorbe humedad dentro de su estructura molecular. Por tanto, para evitar que la pieza extraída del proceso de inyección posea defectos se debe secar.

Para el secado de material se utiliza el deshumidificador.



Imagen 8: Deshumidificador

Es un equipo que, mediante el proceso que se puede observar en el diagrama que aparece en la imagen adjunta, elimina la humedad de los materiales higroscópicos.

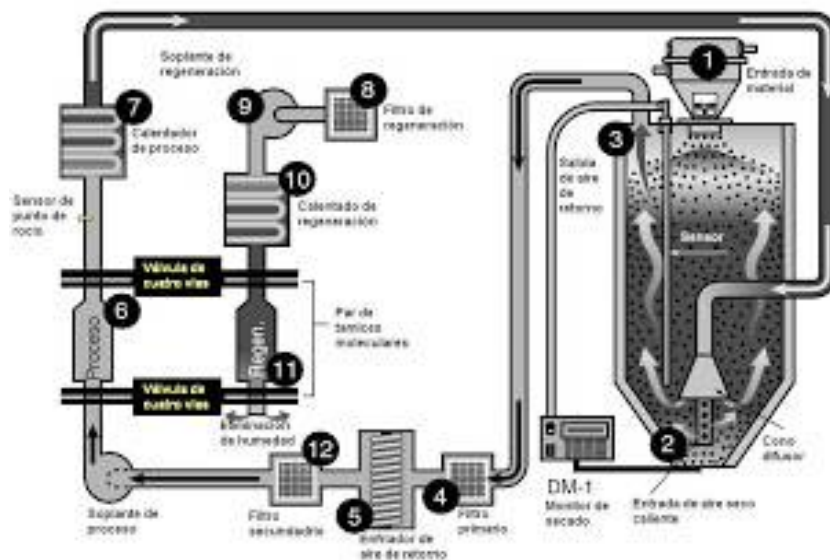


Imagen 9: Deshumidificador

Imagen 9: Diagrama del proceso de deshumidificación

El proceso consiste en hacer pasar aire seco de bajo contenido de humedad, por el silo donde se encuentra el material a secar y de esta manera eliminar toda la humedad que pueda poseer. El aire húmedo que sale por la parte superior del silo, pasa por un filtro para eliminar las partículas finas de material y como la

temperatura de este es elevada, es bajada para optimizar la adsorción de humedad del material. Finalmente este es reciclado y reutilizado.

- Analizador de redes

Es un instrumento habilitado para analizar la transmisión de señales eléctricas, conocidas como parámetros de dispersión. Posee la capacidad de detectar y prevenir el exceso de consumo (kW·h), analizar curvas de carga para ver dónde se produce la máxima demanda de energía y detectar la necesidad de instalación de una batería de condensadores, así como su potencia.

Los analizadores de redes disponen de la más alta tecnología, miden una gran variedad de parámetros eléctricos (armónicos, valor eficaz, intensidad, voltaje, potencia activa, potencia reactiva, etc.) con el principal objetivo de obtener el control y la gestión de una máquina, permitiendo optimizar al máximo los costes energéticos.

De todos estos parámetros los que realmente son interesantes son la potencia activa y la potencia reactiva, ya que son las que mejor muestran el consumo energético realizado por parte de la máquina durante cada ciclo de inyección.

La potencia activa, es aquella energía que es suministrada a la máquina y que es convertida en trabajo, es la que se aprovecha como potencia útil.

La potencia reactiva es la potencia que necesitan las bobinas y los condensadores para generar campos magnéticos o eléctricos, pero que no se transforma en trabajo efectivo, sino que fluctúa por la red entre el generador y los receptores.

7.1.4 Detalle materiales (descripción del material plástico).

El material plástico utilizado para la realización del experimental es policarbonato Makrolon 2407 tal y como se observa en la imagen adjunta a continuación.



Imagen 10: Analizador de redes



Makrolon 2407

General purpose grades / Low viscosity

Global grade; MVR (300 °C/1.2 kg) 19 cm³/10 min; General purpose; Low viscosity; UV stabilized; Easy release; Injection molding - Melt temperature 280 - 320 °C; Available in transparent, translucent and opaque colors

ISO Shortname

ISO 7381-PC,MLR,(...)-18-B

Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
Rheological properties				
C Melt volume-flow rate	300 °C; 1.2 kg	cm ³ /10 min	ISO 1133	19
C Molding shrinkage, parallel	80x80x2; 500 bar	%	ISO 294-4	0.65
C Molding shrinkage, normal	80x80x2; 500 bar	%	ISO 294-4	0.65
Molding shrinkage, parallel/normal	Value range based on general practical experience	%	b.a. ISO 2577	0.5 - 0.7
C Melt mass-flow rate	300 °C; 1.2 kg	g/10 min	ISO 1133	20
Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)				
C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2400
C Yield stress	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	96
C Yield strain	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	6.0
C Nominal strain at break	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	> 50
Stress at break	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	85
Strain at break	50 mm/min	%	b.a. ISO 527-1,-2	120
C Tensile creep modulus	1 h	MPa	ISO 890-1	2200
C Tensile creep modulus	1000 h	MPa	ISO 890-1	1900
Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178	2350
Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178	98
Flexural strain at flexural strength	2 mm/min	%	ISO 178	7.0
Flexural stress at 3.5 % strain	2 mm/min	MPa	ISO 178	74
C Charpy impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eJ	N
C Charpy impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eJ	N
C Charpy impact strength	-60 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eJ	N
Charpy notched impact strength	23 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7501b.a; ISO 179-1eA	65P(C)
Charpy notched impact strength	-30 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7501b.a; ISO 179-1eA	14C
Izod notched impact strength	23 °C; 3.2 mm	kJ/m ²	b.a. ISO 180-A	75P(C)
Izod notched impact strength	-30 °C; 3.2 mm	kJ/m ²	b.a. ISO 180-A	12C
C Puncture maximum force	23 °C	N	ISO 6603-2	5100
C Puncture maximum force	-30 °C	N	ISO 6603-2	6000
C Puncture energy	23 °C	J	ISO 6603-2	55
C Puncture energy	-30 °C	J	ISO 6603-2	65
Ball indentation hardness		N/mm ²	ISO 2039-1	118

Imagen 11: Ficha técnica del material

4.2. Desarrollo del experimento

7.1.1 Identificación de los principales parámetros de control de proceso (breve resumen).

Los principales parámetros de control del proceso de inyección son los que se presentan a continuación

- Dosificación. Es el parámetro que determina la cantidad de material a plastificar.
- Contrapresión. Es la presión que impide el retroceso del husillo y por lo tanto el avance del plástico durante la fase de plastificación
- Velocidad de giro del husillo. Es el número de revoluciones del husillo que son determinantes para una homogénea plastificación del material plástico

- Descompresión o succión del husillo, la cual tiene la misión de reducir la presión de la masa dentro de la cámara después de plastificar.
- Tiempo de residencia en cilindro del material, es un parámetro a tener en cuenta si el material utilizado es sensible al calor
- Avance del frente de flujo que debe ser, en todo momento uniforme, a velocidad constante y alcanzar los últimos puntos de llenado de forma simultánea.
- Velocidad de inyección. Es la velocidad del flujo de material dentro de la cavidad del molde y es un parámetro que viene determinado por la forma de la pieza y por el sistema de entradas. Tiene que ajustarse para conseguir un flujo lo más uniforme y constante posible.

Tiene que ser lo más alta posible para:

- Prevenir el enfriamiento prematuro del plástico en el molde durante la inyección
- Evitar diferentes tiempos de enfriamiento y grados de contracción
- Mejorar la transferencia de presión en el molde

Aunque no tan altas como para que aparezcan defectos en la pieza como pueden ser el jetting, manchas en la pieza y atrapamiento del aire.

- Presión de inyección. Presión ejercida sobre el material fundido para que avance, salga por la boquilla y entre en el molde. Esta presión es ejercida por el husillo hasta que llega al punto de conmutación, que es aquel en el cual se pasa del llenado a la compactación. La transición entre el llenado y la compactación debe realizarse de forma que se eviten picos en el interior de la cavidad.
- Presión de compactación o remanencia es del orden del 30 – 60 % de la presión de inyección, que dependerá, en parte, de sí el material es amorfo o cristalino. Materiales semicristalinos precisan presiones de remanencia más bajas que los materiales amorfos. Se debe controlar que no sea muy elevada porque puede crear rebabas en la pieza y que tampoco sea muy baja porque puede crear rechupes.
- Punto de conmutación es la transición entre llenado y compactación
- Tiempo de compactación, tiempo que transcurre hasta que se enfría la entrada de material a la cavidad
- Temperatura del cilindro es aquella a la que se calienta el material en las diferentes partes del cilindro para que pueda introducirse en el interior del molde. El perfil de temperaturas que puede tener el cilindro puede ser horizontal (el material se calienta a la misma temperatura en todas las zonas del cilindro), ascendente (la temperatura asciende gradualmente) y en forma de tejado (la temperatura asciende y luego desciende).

Esta temperatura varía en función del tipo de material, y no debe ser superior a la temperatura a la que comienza a descomponerse, pero debe ser lo suficientemente elevada para permitir que el material fluya correctamente.

- Temperatura del molde es aquella a la cual se encuentra las paredes del molde. Debe ser lo suficientemente baja para enfriar el material fundido y conseguir que solidifique, pero no demasiado baja que haga que contraiga la pieza o que cree defectos en ella.

Es un parámetro sobre el cual puede actuarse durante el proceso, pero que también se debe tener en cuenta en el diseño del molde al diseñar el sistema de enfriamiento.

7.1.2 Selección final de parámetros para el DOE y justificación del uso de los mismos.

Los parámetros finales que se ha decidido monitorizar son la temperatura del cilindro y la temperatura del molde. Esto es debido a que son las variables que se pueden ver alteradas sin la interacción del operario, es decir, que se pueden desconfigurar más fácilmente durante el proceso de inyección.

7.1.3 Descripción del DOE (tabla con experimental y codificación).

La tabla que recopila todo el experimental contiene las temperaturas que se deben introducir en las diferentes partes de la unidad de inyección y en el molde junto con un apartado de observaciones, en el cual se pueden describir los resultados de cada experimento.

H7X (°C)	H2X (°C)	H3X (°C)	H4X (°C)	H5X (°C)
260,0 260,0 °C	230,0 229,8 °C	240,0 240,1 °C	250,0 250,2 °C	40,0 38,4 °C

Imagen 12: Zonas de calefacción

A continuación se presenta la nomenclatura de las diferentes temperaturas:

- Temperatura del molde (°C) H7X
- Temperatura de la boquilla (°C) H2X
- Zona cilindro cerámica 1 (cercana a la boquilla) (°C) H3X
- Zona cilindro cerámica 2 (zona media del cilindro) (°C) H4X
- Zona cilindro cerámica 3 (cercana a la tolva) (°C) H5X

7.1.4 Metodología de desarrollo y ejecución del experimental (incluyendo; ajuste inicial de máquina, sistemática para variación de parámetros, sistemática para toma de datos y posterior registro de resultados para envío a ITI).

Previo al proceso del desarrollo del experimental se debe realizar el ajuste de la máquina inyectora. Para ello es necesario seguir los siguientes pasos:

- 1) Revisión de ficha técnica del material. Con la revisión de la ficha técnica podemos conocer los intervalos de temperaturas en los que se debe trabajar. En el caso de este experimental, se debe coger la ficha técnica del Policarbonato. Para el policarbonato, el intervalo de temperaturas para el cilindro va desde 280 a 320°C y para el molde de 60 a 80°C
- 2) Purgar. Antes de iniciar el proceso de inyección se debe purgar el cilindro para limpiarlo de los restos de material que pueda haber de inyectadas anteriores. Si no se realizase una purga, las piezas que se obtuviesen en las primeras inyectadas podrían arrastrar el material anterior, creando de esta manera defectos tanto superficiales como internos. Para la purga se controlan los siguientes parámetros:
 1. Velocidad de purga.
 2. Contrapresión.
 3. Estimar un tiempo de purga de unos 2 minutos.
- 3) Introducir valores de temperatura de husillo.

A partir de los valores de ficha técnica, introducir valores siguiendo un perfil determinado.

 - Si hay limitación de máquina en el aumento de temperatura, introducir saltos pequeños de temperatura para evitar que salte alarma y la máquina se bloquee. Revisar el aspecto del fundido tras aumentar las temperaturas.
 - Hacer descompresión (5 mm) para evitar el moqueo mientras se sigue ajustando la máquina.
- 4) Ajuste del molde. Ajuste de movimiento de molde y boquilla.
 - Mover el molde, en modo manual, a baja velocidad.
 - Programar las etapas de cierre, fijando las cotas:
 - 1ª etapa: velocidad alta, hasta alcanzar las guías.
 - 2ª etapa: velocidad más baja, hasta distancia de 5 mm entre placas.
 - 3ª etapa: activar seguro de molde (5 KN de fuerza como máximo. Fijadas a 0,5 mm + altura de pieza expulsada).
 - 4ª etapa: Fijar la presión de cierre en modo manual.
 - Programar las etapas de apertura de molde, fijando las cotas:
 - Aplicar los valores de la secuencia del cierre pero a la inversa.
 - Etapa final de apertura con velocidad lenta para que no se pase “de frenada”.
 - Programar Avance de carro en Modo Manual para ajustar el apoyo de la boquilla en el molde, a baja velocidad.
 - Programar Expulsores, en modo Ajuste.

- Ver carrera máxima de expulsión, en velocidad baja.
- En la práctica de ejemplo, se fija un recorrido de 1.5 mm a la carrera máxima que se permita (por seguridad).

5) Programación llenado del molde.

La velocidad y volumen de llenado se deben ajustar a la pieza a inyectar. Para ello se deben seguir los siguientes pasos:

- Colocar un 1º perfil, estableciendo una velocidad media de inicio.
Se debería contar con pieza de muestra o volumen de inyectada (información facilitada por el diseñador o el matricero).
- Se deben ir aumentando poco a poco los valores de cota para calcular el volumen, sin modificar ni añadir más perfiles.
- Se va registrando el volumen necesario para llenar la cavidad y los bebederos.
- Se le añaden inicialmente unos 5 mm de cojín.
- Se desplaza el recorrido del husillo para ajustarse a la carrera final calculada y disminuir el tiempo de resistencia del material.
- Se van introduciendo los perfiles de velocidades en función del espesor de la pieza y el recorrido del flujo. En este caso la pieza tiene dos perfiles.
- Se acaba ajustando el valor del cojín para evitar el efecto "rebote" durante el llenado, antes de empezar a programar la compactación.
- Se inicia la compactación:
 - Se toma como valor de partida que la presión de compactación sea la mitad de la presión de llenado.
 - El tiempo de compactación se establecerá en función del espesor de la pieza y de la longitud de flujo. A mayor espesor y longitud, valores más altos de presión de compactación.
 - Se va variando el tiempo de compactación hasta que se observe que la pieza está completa y el peso de la pieza se mantiene estable.

6) Programación de las etapas de expulsión.

- Plantear dos perfiles:
 - 1º perfil: Empuja suave la pieza.
 - 2º perfil: Golpea y tira la pieza.

7) Estrategia para reducción de tiempos de ciclo:

- Ir a la pantalla del control que muestra los tiempos de cada una de las etapas del ciclo.
- Se atacarían las siguientes etapas, por orden:
 - Tiempo de enfriamiento (bajar temperatura de molde).
 - Tiempos en recorridos de apertura, cierre y expulsión.
 - Reducir el tiempo de enfriamiento si nos lo permite el tiempo de plastificación y la pieza mantiene el aspecto correcto.
 - Suprimir avance y retroceso de boquilla y dejarla pegada al molde.

Todo este proceso se realizará solo al inicio del experimental. Una vez ya esté ajustada la máquina y realizadas las muestras de la primera probeta, que es aquella que se tomará como referencia, se pueden empezar a variar los parámetros. Las probetas que se inyecten a continuación mantendrán fijos los parámetros con los cuales se ha hecho el ajuste y lo único que se variará serán las diferentes temperaturas del cilindro y la del molde. De esta manera se podrá observar cómo afecta la variación de las temperaturas a la pieza final.

De los diferentes experimentos realizados se recogen datos de los parámetros de respuesta y de los consumos energéticos de aproximadamente 20 muestras y se realizan fotografías para poder apreciar el aspecto final de la pieza. Todo esto se recopila en carpetas y estas son enviadas al Instituto Tecnológico de Informática para que efectúe la correcta interpretación.

5. Caso de uso “Centro de mecanizado de multicomponentes de calzado”

5.1. Descripción del experimento

Para realizar el caso práctico del centro de mecanizado de multicomponentes de calzado, se ha decido que se realizará la creación de una horma. Las hormas son esenciales en la creación de calzado, puesto que a partir de ellas se va formando el zapato que se quiere diseñar. Por esta razón, su elección no ha sido al azar, sino que se ha tomado por su gran importancia en el desarrollo del calzado.

8.1.1 Resumen del proceso de fabricación.

Gracias a los avances tecnológicos, el proceso de fabricación de una horma ha pasado de un estado en el que todo era manual a un proceso en el que la automatización y la computarización han permitido hacer hormas mucho más precisas y con periodos de tiempo mucho más cortos.

El proceso de fabricación consiste en primer lugar en el diseño en sí de la horma. Este diseño se lleva a cabo mediante software específico y en él se puede ver cómo va a ser la horma terminada, pudiendo hacerla al gusto del fabricante, ya sea cambiando alturas o anchuras o haciéndola de alguna forma especial.

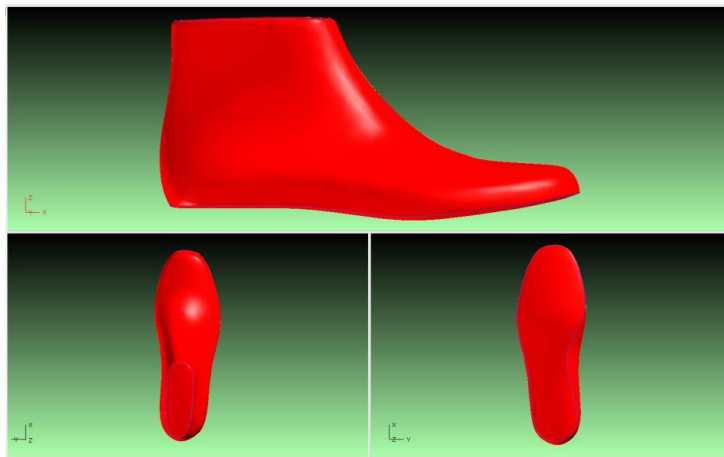


Imagen 14.- Diseño de una horma

Cuando el diseño esta realizado y es a gusto del fabricante, el proceso continua con la realización de un programa que pueda mecanizar la horma deseada. Este programa, también realizado por ordenador, utiliza la horma diseñada para sacar trayectorias sobre ella y una vez tenga las trayectorias construidas, transformarlas a un lenguaje comprensible por un centro de mecanizado para su fabricación.

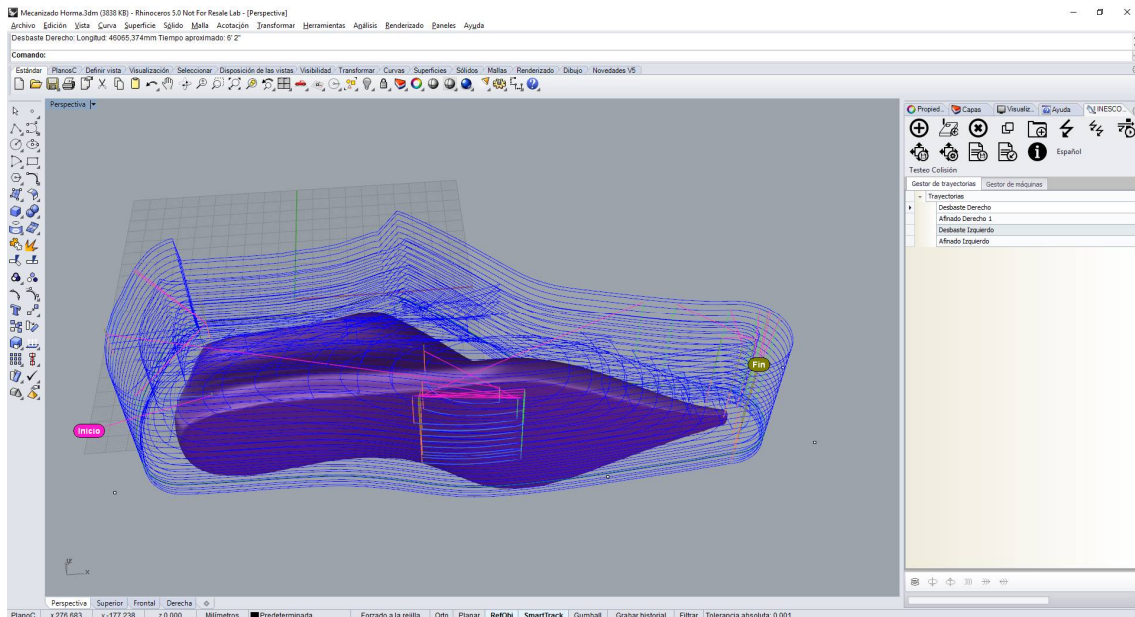


Imagen 15.- Trayectorias para su fabricación

Una vez que se tenga el programa comprensible por el centro de mecanizado, este se pasa para su fabricación, aunque estas de ponerlo en marcha hay que preparar unos bloques para la mecanizado de hormas, llamado comúnmente tarugos, en lo que aparecerá la horma en sí.



Imagen 16.- Bloques para la realización de hormas

Estos bloques suelen ser bloques grandes, bastante más grandes que el tamaño final de la horma. Para su utilización hay que realizarle una serie de modificaciones para que puedan ser utilizados en el centro de mecanizado, como la colocación de soportes en su parte superior.

Una vez que los bloques están preparados y puestos en el centro de mecanizado, este se pone en marcha con el programa diseñado anteriormente y se produce la fabricación de la horma conforme a lo esperado por el fabricante. Cuando el proceso ha terminado, tenemos nuestra horma lista para su uso.



Imagen 17.- Hormas terminadas

8.1.2 Descripción de pieza/producto demostrador

La pieza que se va a llevar a cabo para demostrar el correcto funcionamiento de Optiman es una horma para el calzado.

La horma es el soporte sobre el que montares el zapato, de modo que sus medidas, formas, proporciones, etc... van a condicionar el calce del zapato. La horma consta de 10 partes diferentes.

1. Cuña → es la pieza situada en la parte delantera de la horma, en el alto empeine. Se utiliza para retirarla ante de deshormar el zapato, para no provocar deformaciones o roturas.
2. Lupe → es la superficie que abarca la parte superior de la horma. Sirve de apoyo a muchas operaciones.
3. Zona de enfranque → es el área de la horma comprendida entre el frente del tacón y la base de los metatarsianos.
4. Altura de pique o quebrante de la puntera → es la vertical existente entre la punta de la horma y el plano de apoyo. Es consecuencia de lo que llamamos ángulo de salida, necesario para poder caminar.

5. Chirlaque → es un elemento metálico cilíndrico y hueco que atraviesa la zona del lupe y sirve para poder fijar el tacón en el proceso de fabricación.
6. Altura de tacón → es la mitad de la distancia entre el punto más prominente de la planta de la horma y el plano base.
7. Talonera → es la zona trasera de la horma, donde se aposenta el tacón.
8. Enfranque interior → es la línea que une la talonera con la planta por la parte interior.
9. Enfranque exterior → es la línea que une la talonera con la planta por la parte exterior.
10. Planta → es la parte delantera de la horma, desde los metatarsianos hasta la punta.

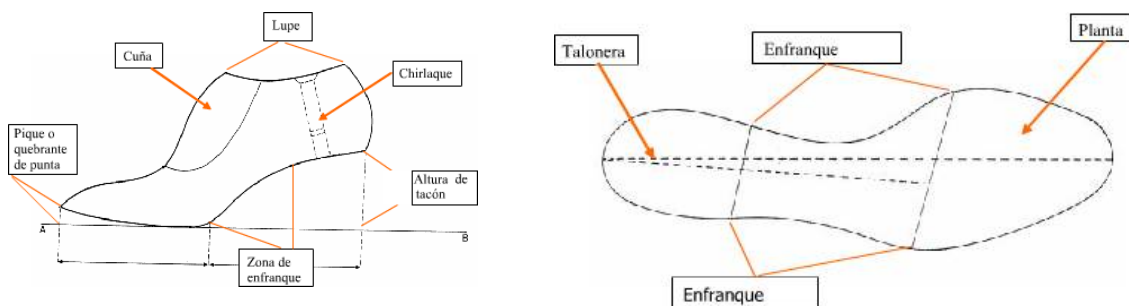


Imagen 18.- Partes de la horma

8.1.3 Descripción de la configuración de la máquina y equipamiento auxiliar empleado, incluyendo el equipo de medición de consumos.

El centro de mecanizado que se ha utilizado para realizar este proyecto ha sido el B-640 de la marca Kondia.



Imagen 19.- Imagen centro de mecanizado empleado

Este centro de mecanizado tiene las siguientes características reseñales.

Dimensiones de mesa	
Dimensiones de mesa de trabajo	700x350 mm
Nº de canales en T	3
Distancia entre canales	110 mm
Ancho canal en T	18 mm
Altura de la mesa	850 mm
Cursos de trabajo	
Curso longitudinal	600 mm
Curso transversal	400 mm
Curso vertical	380mm
Dimensiones husillo a bolas sobre X-Y-Z	32/32/32 mm
Peso máximo recomendado sobre la mesa	300 kgs
Avances	
Avance rápido sobre los ejes X-Y	24.000 mm/min
Avance rápido sobre el Z	20.000 mm/min
Avance trabajo	5.000 mm/min
Cabezal	
Cono de adaptación(Tamaño 40)	ISO7388
Gama de velocidad (Standard)	100-6.000 r.p.m
Máximo par disponible/ a 330r.p.m	85 Nm
Potencia Motor principal	7.5 Kw
Distancia max. Del husilo a la mesa	380 mm
Parada orientada programable cada	0.1 seg
Sistema de refrigeración husillo cabezal	Incluido
Cambiador automático de herramientas	
Número de herramientas	18
Tipo de selección	Secuencial (Bidireccional)
Diámetro máximo de herramienta (entre herramientas contiguas)	85 mm
Diámetro máximo de herramienta (entre herramientas contiguas)	135 mm
Máxima longitud de herramienta	250 mm
Peso máximo de herramientas	6 Kg
Tiempo cambio de herramienta	6 seg
Accionamientos	
Motor cabezal	5.5/7.5 Kw
Motor ejes X-Y-Z	0.85Kw(6.2Nm)
Sistema de refrigeración husillo cabezal	0.8Kw
Sistema de refrigeración herramienta	0.75Kw
Potencia total instalada	12Kw
Generales	
Superficie ocupada en planta	1.940x1.950 mm
Altura máxima	2.240 mm
Peso neto	3.100 Kg
Precisión	
Precisión de posicionamiento	+/-0.01 mm
Precisión de repetibilidad	+/-0.005 mm
Resolución	0.001 mm

Tabla 1.- Características de la máquina

La planta del mismo lo podemos ver en la siguiente Imagen.

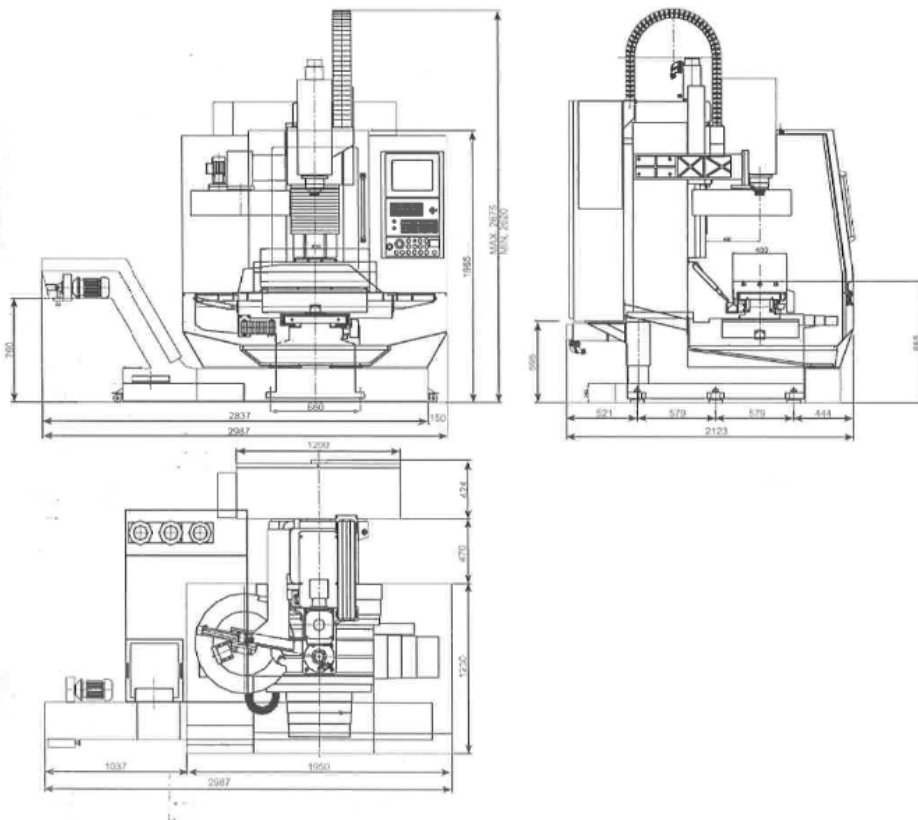


Imagen 20.- Detalle de centro de mecanizado

En el caso de los centros de mecanizado, la máquina no necesita una conlmagenció estándar propiamente dicha, puesto que esta conlmagenció viene dada en el archivo que se genera para realizar la horma. En este archivo hay datos para la conlmagenció del centro de mecanizado tanto para el desplazamiento de la fresa como para las revoluciones de la misma.

El desplazamiento de la fresa se refiere a cuando se desplaza la fresa por el bloque a la hora de hacer una horma. Este desplazamiento puede variar y según sea más o menos desplazamiento la horma saldrá en mejores o peores condiciones.

Igualmente, las revoluciones de la fresa son importantes puesto que proporcionan al centro de mecanizado más o menos fuerza a la hora de "comer" material para la realización de la horma.

A parte de estas dos variables que proporciona el propio programa, hay que preparar el centro de mecanizado para realizar el trabajo de creación de una horma. Para ello primeramente hay que "encontrar los puntos cero". Este proceso se realiza para fijar las coordenadas con las que el centro de mecanizado trabaja. Estas coordenadas no son siempre las mismas y van en función de la pieza a fabricar, siendo muy diferentes unas de otras por el volumen de las mismas. Para el caso que nos ocupa, el punto 0,0,0 proveniente de las coordenadas X, Y y Z, se fijará en el bloque que coge la horma. Para ello se moverá a mano el taladro que posee el centro de mecanizado hasta el punto medio del bloque. Cuando el taladro del centro de mecanizado este en ese punto, se apuntan las coordenadas que nos proporciona el centro de

mecanizado y se adjudican como puntos 0. En ese momento, el sistema entiende que estos puntos son los de referencia, perdiendo lo que tenía anteriormente.

De igual forma, hay que poner en marcha los sensores diseñados para que el sistema pueda recoger toda la información proveniente de la fabricación de hormas, ya sea consumos, revoluciones, avances y vibraciones. Para ello, una vez colocados en sus respectivos lugares dentro del centro de mecanizado, se ha habilitado una caja donde se encuentra toda la electrónica que recoge estos datos.

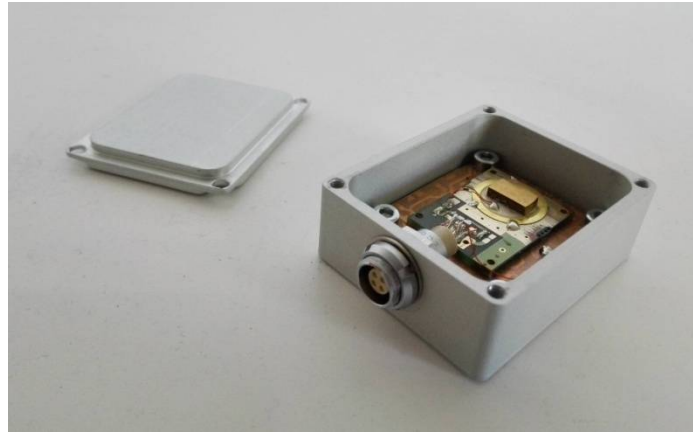


Imagen 21.- Detalle de los sensores

Como se puede apreciar en la siguiente Imagen, la caja tiene prevista por conectores convencionales, los cuales facilitan la conexión de los sensores con la electrónica de una manera cómoda y sencilla. De igual forma, la caja tiene un conector USB que se conectará directamente al ordenador para que éste pueda procesar la información recibida por la electrónica. El usuario simplemente tendrá que conectar los distintos sensores a la caja y pulsar el botón de encendido para que la electrónica se ponga en funcionamiento, facilitando el uso de la misma para cualquier tipo de operador, tenga o no tenga experiencia.



Imagen 22.- Detalle de la caja

Por último, se colocará un ordenador que posea el software necesario para la captación de estos datos. Este software se ha diseñado explícitamente para este proyecto, por lo que se ha realizado de tal forma que su funcionamiento sea sencillo para el usuario. Este ordenador se pondrá en marcha y dejará corriendo el software que iniciará las capturas de datos cuando estas comiencen.

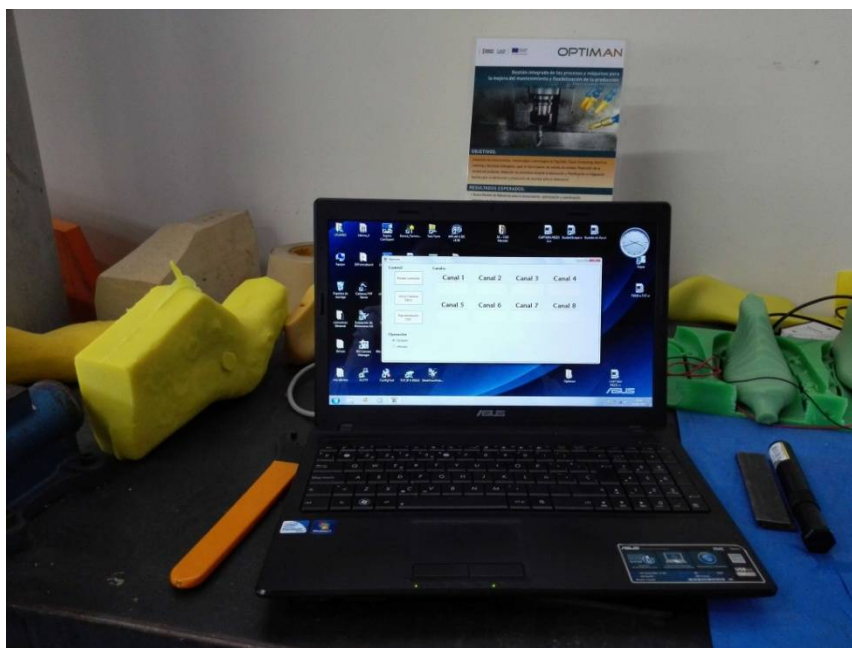


Imagen 23.- Detalle del ordenador con software

Cuando todos estos componentes del sistema están en funcionamiento, el sistema está listo para ser usado y captar, almacenar y procesar los datos generados en el proceso de creación de una horma.

8.1.4 Detalle materiales.

Para la construcción de la horma se ha utilizado un bloque que está fabricado a base de polietileno de alta densidad.

El polietileno de alta densidad o PEAD (*HDPE* en inglés) es un polímero de cadena lineal no ramificada, por lo cual su densidad es alta y las fuerzas intermoleculares también.

El HDPE es un material termoplástico parcialmente amorfo y parcialmente cristalino. El grado de cristalinidad depende del peso molecular, de la cantidad de comonomero presente y del tratamiento térmico aplicado.

Presenta mejores propiedades mecánicas (rigidez, dureza y resistencia a la tensión) y mejor resistencia química y térmica que el polietileno de baja densidad, debido a su mayor densidad. Además es resistente a las bajas temperaturas, impermeable, inerte (al contenido), con poca estabilidad dimensional y no tóxico.

También presenta fácil procesamiento y buena resistencia al impacto y a la abrasión. No resiste a fuertes agentes oxidantes como ácido nítrico, ácido sulfúrico fumante, peróxidos de hidrógeno o halógenos.

Sus propiedades más destacables son las siguientes:

PROPIEDADES ELÉCTRICAS	
Constante dieléctrica a 1MHz	2,3-2,4
Factor de disipación a 1MHz	$1-10 \times 10^{-4}$
Resistencia dieléctrica (KV mm ⁻¹)	22
Resistencia superficial (ohm/sq)	10^{13}
Resistencia de volumen (ohm cm)	$10^{15}-10^{18}$

Tabla 2.- Propiedades eléctricas del polietileno de alta densidad

PROPIEDADES FÍSICAS	
Absorción de agua en 24h (%)	< 0,01
Densidad (g/cm ³)	0,94-0,97
Índice refractivo	1,54
Resistencia a la radiación	Aceptable
Resistencia al ultra-violeta	Mala
Coefficiente de expansión lineal (K ⁻¹)	2×10^{-4}
Grado de cristalinidad (%)	60-80

Tabla 3.- Propiedades físicas del polietileno de alta densidad

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Módulo elástico E (N/mm ²)	1000
Coefficiente de fricción	0,29
Módulo de tracción (GPa)	0,5-1,2
Relación de Poisson	0,46
Resistencia a tracción (MPa)	15-40
Esfuerzo de rotura (N/mm ²)	20-30
Elongación a ruptura (%)	12

Tabla 4.- Propiedades mecánicas del polietileno de alta densidad

PROPIEDADES TÉRMICAS	
Calor específico ($J K^{-1} Kg^{-1}$)	1900
Coeficiente de expansión ($x 10^6 K^{-1}$)	100-200
Conductividad térmica a 23 °C (W/mK)	0,45-0,52
Temperatura máxima de utilización (°C)	55-120
Temperatura de reblandecimiento (°C)	140
Temperatura de cristalización (°C)	130-135

Tabla 5.- Propiedades térmicas del polietileno de alta densidad

RESISTENCIA QUÍMICA	
Ácidos-concentrados	Buena-Aceptable
Ácidos-diluidos	Buena
Alcalís	Buena
Alcoholes	Buena
Cetonas	Buena-Aceptable
Grasas y Aceites	Buena-Aceptable
Halógenos	Aceptable-Buena
Hidro-carbonios halógenos	Aceptable-Buena
Hidrocarburos aromáticos	Aceptable

Tabla 6.- Resistencia química del polietileno de alta densidad

El polietileno de alta densidad se sintetiza por medio de un procedimiento encontrado por el profesor Karl Ziegler, en los años 1949-1955, llamado polimerización de *Ziegler-Natta*. Se trata de un proceso de polimerización catalítica (catalizador de *Ziegler-Natta*) a baja presión (la presión de fabricación del *HDPE* está por debajo de 14 MPa).

Cuando se inyecta etileno en una suspensión de etilato de aluminio y éster titánico en un aceite, se polimeriza el etileno con desprendimiento de calor, el cual es absorbido por el disolvente, y forma un producto macromolecular.

También se puede obtener con la polimerización del etileno a presiones relativamente bajas, con un óxido metálico sobre sílice o alúmina como catalizador (catalizadores tipo *Phillips*). Son los llamados procesos de *Phillips* y *Standard Oil* y son responsables de la fabricación de más de un tercio de todo el polietileno que se distribuye a nivel mundial.

El polietileno de alta densidad se produce normalmente con un peso molecular que se encuentra en el rango de 200.000 y 500.000, pero puede ser mayor. La distribución de pesos moleculares del *HDPE* es en gran parte controlada por el tipo de catalizador usado en la polimerización y por el tipo de proceso de fabricación empleado.

[3]

5.2. Desarrollo del experimento

8.2.1 Identificación de los principales parámetros de control de proceso.

Los principales parámetros que vamos a cuantificar y controlar en el experimento son los siguientes:

- Energía consumida → es un parámetro muy importante a tener en cuenta, ya que un valor elevado del mismo nos indicará un consumo excesivo de energía en hacer una operación.
- Revoluciones de la fresa → este parámetro es necesario para saber la velocidad de rotación de la fresa en todo momento, ya que su valor hará que el giro que realiza la fresa en el momento de realizar la horma sea mayor o menor, originando que la pieza salga mejor o peor y que se produzcan problemas en su realización.
- Avance de la fresa → al igual que las revoluciones de la fresa, el avance también es un parámetro importante a tener en cuenta, debido a que el avance de la misma en el proceso de creación de la horma puede originar fallos en su creación por tener un avance más rápido del necesario, originando que salgan defectos en algunas zonas de la horma.
- Vibraciones del centro de mecanizado → al producir una horma, el centro de mecanizado tiene vibraciones por las operaciones que tiene que hacer entre el bloque para hacer la horma y la fresa que tiene. Estas vibraciones pueden ser mayores o menores según se va operando con el bloque para hacer la horma, originando, cuando el sistema no funciona correctamente unas vibraciones que no son las esperadas, siendo mucho más altas que en situaciones en las que la horma se hace correctamente.

Todos estos parámetros de control se han tenido en cuenta para tener el centro de mecanizado sensorizado en todo momento y conocer cómo evoluciona el sistema a la hora de fabricar una horma.

8.2.2 Selección final de parámetros para el DOE y justificación del uso de los mismos.

Los parámetros finales que se ha decidido monitorizar han sido todos los que aparecen en el punto 5.2.1 debido a sus distintas propiedades e información complementaria que proporciona uno sobre el otro para poder conocer con exactitud cuál ha sido el resultado del proceso de creación de una horma en el centro de mecanizado.

8.2.3 Descripción del DOE (tabla con experimental y codificación).

Aunque en el caso de la máquina de inyección, esta tabla es relevante ya que el mismo equipo presenta los datos y las conlmgenciones, en el centro de mecanizado esto no ocurren y no tenemos ninguna tabla ni ningún display donde se nos presente algo parecido a la máquina de inyección.

8.2.4 Metodología de desarrollo y ejecución del experimental (incluyendo; ajuste inicial de máquina, sistemática para variación de parámetros, sistemática para toma de datos y posterior registro de resultados para envío a ITI).

Antes de poder comenzar con el proceso de creación de una horma hay que realizar una serie de pasos previos a la hora de poner en marcha el centro de mecanizado y prepararlo para su uso. Para ello es necesario seguir los siguientes pasos:

- 1) Encendido del centro de mecanizado: A la hora de su encendido hay que tener en cuenta que en este proceso, una vez que el centro se ponga en estado de funcionamiento hay que accionar una serie de botones para poder proporcionar energía suficiente a los motores, estos botones están en el panel frontal del mismo.
- 2) Introducción de aire: A la vez que se acciona el interruptor general para encender el centro de mecanizado, se tiene que abrir una válvula que está al lado del interruptor general de la misma para permitir que el aire entre en el sistema. Este interruptor se tiene que abrir por dos motivos.
 - Para que se pueda refrigerar la fresa cuando se hace una pieza.
 - Para que se pueda sujetar el porta-fresas en el centro de mecanizado.
- 3) Colocación del tarugo: Antes de su colocación, el tarugo se ha preparado con una serie de orificios para su sujeción con un porta-hormas específico que se utiliza en el centro de mecanizado. Cuando se ha colocado el tarugo, hay que apretar el porta-hormas con fuerza a la mesa del centro de mecanizado, ya que si no es así, el porta-hormas puede caerse o modificar su colocación, haciendo que la horma no salga correctamente. Una vez apretada, hay que sacar los puntos 0,0,0 X,Y,Z, para conlImagener las coordenadas del centro de mecanizado respecto al tarugo para la fabricación de la horma, estas coordenadas hay que almacenarlas y las coordenadas que se utilicen en la fabricación de la horma siempre estarán referidas a estos puntos.
- 4) Carga del programa: El programa generado a partir de software en un ordenador hay que cargarlo en el centro de mecanizado para su ejecución. Este se pasa al centro de mecanizado mediante un programa FTP. El archivo se almacena en el centro de mecanizado en la ruta que nosotros consideremos la más apropiada, pudiendo ser la que sea, puesto que su colocación no interfiere a la hora de ejecutar el programa. Una vez almacenado, hay que buscar el archivo mediante los botones de control del centro de mecanizado y proceder a su ejecución. En este archivo ya vienen conlImagendas las velocidades de desplazamiento de la fresa y de rotación de la fresa.
- 5) Comprobación de los sensores: Antes de ejecutar el programa hay que comprobar que los sensores están funcionando correctamente. Este proceso es rápido y consiste en poner en marcha el motor de la fresa y en ver la respuesta de los datos obtenidos. Si

estos datos están dentro de los rangos esperados todo funciona correctamente. Claro está, que no hay que olvidar que el sistema de captación tiene que estar en marcha para coger datos en el proceso de creación.

- 6) Ejecución del programa: Una vez que se ha ejecutado el programa en el centro de mecanizado, este se ocupa de llevarlo a cabo. Hay que tener en cuenta que para la creación de una horma hay que hacer dos procesos independientes, llamados afinado y desbaste y que este afinado y desbaste hay que hacerlo por las dos caras de la horma. Por la colocación de la misma en el centro de mecanizado, el operario tiene que estar atento y modificar el tarugo, cambiando la cara de la horma, cuando acaba cada uno de los procesos para que se pueda completar el proceso de creación de la horma.
- 7) Finalización: Una vez que el operario ha cambiado la horma y ha ejecutado los 4 programas diferentes para hacer la horma, el proceso ha terminado y tenemos creada una horma. La parte final consiste en sacar el porta-hormas del centro de mecanizado y extraer la horma del porta-hormas, teniendo al final la horma sin ninguna sujeción.

Si el usuario quiere realizar más de una horma, el proceso no hay que realizarlo completamente, puesto que todo el proceso de encendido está ya realizado y si ha sido cuidadoso, no hace falta volver a sacar las coordenadas 0,0,0 puesto que serán las mismas que se han sacado en un primer momento.

De los diferentes experimentos realizados se recogen datos de los parámetros de vibraciones, consumos, avances de la fresa y revoluciones de la fresa, además de ver si las muestras obtenidas son buenas o malas. Todos estos datos se han enviado al Instituto Tecnológico de Informática para que efectúe la correcta interpretación.