



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Optimización de la geometría de la cámara de inyección en procesos de Fusión por Inyección a Alta Presión (FIAP). Aplicación a un entorno productivo.

TRABAJO FIN DE GRADO

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

Autor: Daniel Rodríguez Nieto

Director: Félix Faura Mateu

Cartagena, julio de 2021

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, Félix Faura, por el apoyo recibido en esta complicada etapa y por sus correcciones y consejos en la elaboración de esta memoria.

Al señor Yiftah Karni, autor de la tesis doctoral, a partir de la cual, he podido estudiar el método utilizado en este trabajo de manera correcta, por su infinita paciencia y por contestar todas las dudas con las que he podido tropezarme.

A Juan Martínez Pastor, por el interés mostrado en mi trabajo y su colaboración a la hora de realizar el estudio teórico del método.

A Juan José Hernández Ortega, quien también ha estudiado en profundidad la máquina FIAP sobre la que se basa este trabajo, por su preocupación y por su apoyo durante el desarrollo del mismo.

A Javier Conesa Ruiz, quien me ha proporcionado la información necesaria sobre partes específicas de la máquina, sin la cual no habría sido posible un correcto desarrollo del proceso.

A María Cristina García Nieto, doctorando en la UPCT, por sus sugerencias en la elaboración de la memoria y la presentación, y por el apoyo e interés mostrado hacia este trabajo.

A José Javier García Nieto, por su inestimable colaboración durante las etapas más complicadas del estudio, guiándome siempre de manera correcta hacia una solución efectiva.

A mi familia, por el ánimo y la empatía que han mostrado en los momentos que más lo necesitaba.

ÍNDICE DE CONTENIDO

<i>NOMENCLATURA</i>	9
<i>CAPÍTULO 1: VISIÓN GENERAL DEL TRABAJO. INTRODUCCIÓN</i>	11
1.1 Objetivos	11
1.2 Máquinas FIAP	12
1.2.1 Funcionamiento	12
1.2.2 Producción de moldes	14
1.2.3 Partes y características	15
1.2.3.1 Elementos del sistema de sujeción y cierre del molde	15
1.2.3.2 Elementos del sistema de inyección	17
1.2.3.3 Elementos del sistema de control	18
1.3 Fases del proceso de inyección	18
1.3.1 Fase lenta	19
1.3.2 Fase rápida	20
1.3.3 Fase de intensificación de la presión	21
<i>CAPÍTULO 2: MÉTODO PQ2</i>	23
2.1 Conceptos del sistema	24
2.2 Líneas características del método	25
2.2.1 Línea de máquina (LMa)	27
2.2.2 Línea de molde (LMo)	30
2.2.3 Línea de funcionamiento de máquina (LFM)	32
2.2.3.1 Obtención de la constante de la hipérbola	33
2.2.4 Ventana Operacional. Conversión de los ejes	35
2.3 Restricciones del método	37
2.3.1 Tiempo mínimo de llenado	37
2.3.2 Tiempo máximo de llenado	39
2.3.3 Velocidad de puerta mínima	41
2.3.4 Velocidad de puerta máxima	43
2.4 Análisis del método	43
2.4.1 Optimización del área de puerta	44
2.4.2 Diámetro mínimo de cilindro	47
2.4.3 Diámetro máximo de cilindro	49
2.4.4 Cambio en las restricciones	50
2.5 Ejemplo	52
<i>CAPÍTULO 3: APLICACIÓN A UN ENTORNO PRODUCTIVO</i>	63
3.1 Máquina del taller	63
3.1.1 Máquina FIAP	63
3.1.2 Bomba de inyección. Acumulador	64
3.1.3 Horno de fusión	65
3.1.4 Panel de control	66
3.1.5 Molde	67
3.1.6 Sistema de inyección	69
3.2 Toma de datos y medidas	70
3.2.1 Diámetro del cilindro y de la cámara de inyección	70

3.2.2	Diámetro del pistón _____	72
3.2.3	Longitud de la cámara de inyección _____	72
3.2.4	Volumen del molde _____	74
3.2.5	Presión del acumulador _____	76
3.2.6	Velocidad máxima de cilindro _____	77
3.2.7	Límites de la ventana operacional _____	77
3.3	Aplicación del método PQ2 _____	78
<i>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS _____</i>		<i>83</i>
4.1	Desarrollo de aplicación informática _____	83
4.2	Modificación de parámetros _____	87
4.2.1	Datos de molde _____	87
4.2.2	Datos del proceso _____	90
<i>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS _____</i>		<i>95</i>
<i>BIBLIOGRAFÍA _____</i>		<i>97</i>
<i>ANEXOS _____</i>		<i>101</i>
2.1	Ejemplo de representación gráfica. Conversión de ejes _____	101
2.2	Tabla valores velocidad de puerta mínima $J = 750$ _____	103
4.1	Código de programación _____	105

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1.1	Horno de fusión y máquina FIAP del taller de la UPCT	13
Figura 1.2	Ejemplo de molde y pieza formada	14
Figura 1.3	Sistema de refrigeración de la máquina FIAP	15
Figura 1.4	Elementos del sistema de sujeción y cierre del molde. Sistema hidráulico	16
Figura 1.5	(a) Molde disponible en la UPCT e (b) insertos mecánicos intercambiables empleados para modificar la geometría del sistema	17
Figura 1.6	Bomba que proporciona la presión al sistema de inyección	18
Figura 1.7	Fase lenta	19
Figura 1.8	a) Velocidad del pistón superior a la velocidad crítica uH b) Velocidad del pistón inferior a la velocidad crítica	20
Figura 1.9	Representación gráfica de las diferentes fases del proceso	20
Figura 2.1	Esquema del sistema	27
Figura 2.2	Esquema sistema de inyección	28
Figura 2.3	Línea de máquina en el plano PQ2	29
Figura 2.4	LMa para diferentes valores de diámetro de cilindro	30
Figura 2.5	LMa para diferentes valores de presión del acumulador	30
Figura 2.6	Línea de molde en el plano PQ2	32
Figura 2.7	LFM creada a partir de la tangencia a todas las LMa posibles	32
Figura 2.8	LFM y LMa	34
Figura 2.9	El plano PQ2 al completo	36
Figura 2.10	Esquema viento. Detalle Figura 2.1	37
Figura 2.11	Esquema cámara y molde	39
Figura 2.12	Plano PQ2 con LMo límite y el área A como medida de la flexibilidad	44
Figura 2.13	Diferentes pendientes de la LMo	45
Figura 2.14	Triángulo de área A bajo la LFM	46
Figura 2.15	Representación punto de tangencia externo en el plano PQ2	47
Figura 2.16	Gráfica que muestra la restricción generada por el Dcmax. El área rallada es el nuevo valor de A, y el área marcada con cruces la que obteníamos con el método definido en la figura 2.13	49
Figura 2.17	Situación óptima representada en el plano PQ2	50
Figura 2.18	Plano PQ2. AgLFM = 0.00042 m ² ; AgDcmax = 0.00023 m ² ; Dcmin = 0.0964 m	55
Figura 2.19	Plano PQ2. AgLFM = 0.0003 m ² ; AgDcmax = 0.00023 m ² ; Dcmin = 0.0862 m	56
Figura 2.20	Plano PQ2. AgLFM = 0.00026 m ² ; AgDcmax = 0.00022 m ² ; Dcmin = 0.0824 m	58
Figura 2.21	Plano PQ2. AgLFM = 0.00021 m ² ; AgDcmax = 0.00021 m ² ; Dcmin = 0.0647 m	61
Figura 2.22	Plano PQ2 final. AgLFM = 0.00021 m ² ; AgDcmax = 0.00021 m ² ; Dcmin = 0.0647 m	62
Figura 3.1	Vista frontal máquina FIAP	64
Figura 3.2	Vista lateral máquina FIAP	64
Figura 3.3	Depósitos del sistema de inyección	65
Figura 3.4	Horno de fusión y cucharas de colada	65
Figura 3.5	Panel de control del horno	66
Figura 3.6	Panel de controles de la máquina	66
Figura 3.7	Parte fija y móvil del sistema de sujeción del molde	67
Figura 3.8	Parte móvil (izquierda) y fija (derecha) del molde	68
Figura 3.9	Insertos intercambiables para modificar la geometría de los vientos	68
Figura 3.10	Vista general del sistema de inyección	69
Figura 3.11	Detalle de la cámara de inyección y entrada al molde	69
Figura 3.12	Juego completo de cilindro, casquillo y cámara de inyección	70
Figura 3.13	Juego de cilindro N°1	71
Figura 3.14	Juego de cilindro N°2	71
Figura 3.15	Juego de cilindro N°3	71

Figura 3.16	Longitud de la cámara de inyección _____	73
Figura 3.17	Composición porcentual de la aleación de aluminio _____	74
Figura 3.18	Pieza empleada en el taller _____	75
Figura 3.19	Sistema de inyección disponible en el taller del ELDI _____	76
Figura 3.20	Detalle medidores de presión _____	77
Figura 3.21	Plano PQ2 primera iteración. $AgLFM = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $AgDcmax = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $Dcmin = 0.008 \text{ m}$ _____	79
Figura 3.22	Plano PQ2 iteración final. $AgLFM = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $AgDcmax = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $Dcmin = 0.0076 \text{ m}$ _____	80
Figura 3.23	Plano PQ2 segunda iteración. $AgLFM = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $AgDcmax = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $Dcmin = 0.0076 \text{ m}$ _____	81
Figura 4.1	Pantalla de inicio _____	84
Figura 4.2	Método PQ2 _____	84
Figura 4.3	Ventana de cálculos _____	85
Figura 4.4	Ventana de gráfico _____	86
Figura 4.5	Ventana de optimización _____	87
Figura 4.6	Plano PQ2. $Dcmax$ del plano izquierdo es menor que el del plano derecho _____	88
Figura 4.7	Plano PQ2. El volumen de la pieza en la gráfica izquierda es mayor que en la gráfica derecha _____	90
Figura 4.8	Plano PQ2. Gráfica izquierda $t_{fmin} = 18 \text{ ms}$. Gráfica derecha $t_{fmin} = 15 \text{ ms}$ _____	91
Tabla 2.1	Características técnicas de la máquina FIAP. Primera iteración _____	52
Tabla 2.2	Valores límite de la VO. Primera iteración _____	53
Tabla 2.3	Características técnicas de la máquina FIAP. Segunda iteración _____	56
Tabla 2.4	Valores límite de la VO. Segunda iteración _____	56
Tabla 2.5	Características técnicas de la máquina FIAP. Tercera iteración _____	57
Tabla 2.6	Valores límite de la VO. Tercera iteración _____	57
Tabla 2.7	Características técnicas de la máquina FIAP. Cuarta iteración _____	59
Tabla 2.8	Valores límite de la VO. Cuarta iteración _____	59
Tabla 3.1	Medidas de los diferentes diámetros de cilindro, en milímetros _____	72
Tabla 3.2	Medidas de longitud del conjunto de cámara de inyección _____	73
Tabla 3.3	Base de datos inicial del proceso _____	78
Tabla 3.4	Base de datos final del proceso _____	81
Tabla 4.1	Variaciones de los datos de salida (columnas) frente a incrementos en el valor de los datos de entrada (filas) para punto de tangencia interno _____	92
Tabla 4.2	Variaciones de los datos de salida (columnas) frente a incrementos en el valor de los datos de entrada (filas) para punto de tangencia externo _____	93

NOMENCLATURA

C_d	Constante de resistencia característica de cada material	-
E	Energía	J
P	Presión	Pa
ρ	Densidad del metal	kg/m ³
v	Velocidad del metal	m/s
z	Componente altura en la energía potencial	m
P_{acc}	Presión del acumulador	Pa
P_{acc}^*	Presión crítica del acumulador	Pa
P_h	Presión en la cara del pistón	Pa
K_h	Constante de la válvula	-
A_p	Área del pistón	m ²
A_c	Área del cilindro	m ²
D_p	Diámetro del pistón	m
D_c	Diámetro del cilindro	m
Q	Caudal	m ³ /s
P_0	Presión que intersecta la LMa con el eje de ordenadas	Pa
Q_0^2	Caudal cuadrado intersección LMa con el eje de abscisas	m ⁶ /s ²
t_f	Tiempo de llenado del molde	s
v_g	Velocidad de puerta	m/s
A_g	Área de puerta	m ²
g	Gravedad en la Tierra	m/s ²
a	Constante de la hipérbola LFM	W
v_m	Velocidad máxima del pistón con la cámara vacía	m/s
V_m	Volumen del molde y rebosaderos	m ³
M	Número de Mach	-
v_{so}	Velocidad del sonido	m/s
v_a	Velocidad del aire	m/s
P_a	Presión atmosférica	Pa
P_m	Presión en el molde	Pa
q	Flujo de calor	W
L_c	Mitad del grosor del muro de la cámara	m
h	Coefficiente de transmisión de calor	W/m ² °C
C_c	Capacidad calorífica de la ecuación	J/K
T_c	Temperatura de la aleación	K
T_m	Temperatura superficial del molde	K
e_p	Espesor de la puerta	m
J	Factor de atomización	-

CAPÍTULO 1: VISIÓN GENERAL DEL TRABAJO. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos

En el presente trabajo se va a realizar el estudio de un sistema específico de distribución por llenado a presión. Concretamente, de la cámara de inyección. El objetivo último de lo expuesto a continuación será el de determinar la geometría óptima de los componentes de la máquina, como son el diámetro de cilindro, diámetro de pistón, o la presión del acumulador, entre otros.

El problema principal en las máquinas de Fusión por Inyección a Alta Presión es el de la porosidad (imperfecciones en la pieza generadas por el atrapamiento de aire), y reducirla a niveles suficientemente bajos. El objetivo de este trabajo será el de obtener unos parámetros óptimos que permitan reducir la porosidad en las piezas elaboradas gracias a una optimización de la geometría de la cámara de inyección, otorgándoles así unas mejores propiedades mecánicas. Para ello, se tratará de optimizar las variables del proceso.

La cámara de inyección propuesta para optimizar es la correspondiente a la máquina FIAP disponible en el taller del ELDI de la UPCT. Se busca disminuir al máximo la porosidad de la pieza de aluminio fabricada, a partir de la optimización de los parámetros de entrada al molde.

Para conseguir optimizar la geometría y características de los componentes de la máquina de inyección, va a emplearse un método de selección de variables conocido como PQ². Gracias a las ecuaciones que definen este método, es posible definir un entorno de trabajo, dentro del cual, se obtiene una mínima cantidad de aire atrapado en la pieza final.

1.2 Máquinas FIAP

El método de Fusión por Inyección a Alta Presión (FIAP) permite obtener piezas que no son elaborables mediante llenado por gravedad, ya que el metal que las forma podría llegar a solidificar prematuramente. Este método es empleado en la fabricación de piezas de poco espesor y es idóneo cuando se requieren velocidades de producción muy elevadas. La maquinaria utilizada en los procesos FIAP es muy costosa, por lo que en principio, solo es empleada para elevados volúmenes de producción [1]. El material utilizado para el estudio será el aluminio, concretamente, una aleación de aluminio llamada EN AC-47100. En el caso que nos ocupa, el molde de la máquina se encuentra refrigerado. Además, al ser una máquina de inyección de cámara fría, el sistema de inyección se encuentra separado del horno de fusión (al contrario que en el caso de cámara caliente, en el que el horno es parte del sistema de inyección) [14].

1.2.1 Funcionamiento

Se va a explicar, grosso modo, como es el proceso general de esta clase de máquinas de inyección a presión.

Estas máquinas FIAP trabajan hidráulicamente y de manera horizontal, con el molde colocado en posición vertical encima de la cavidad que contiene el metal fundido. Aunque también existen máquinas verticales, se estudiarán únicamente las horizontales. La principal diferencia entre ambas es la dirección en la que el metal líquido se introduce al molde.

Todas las máquinas FIAP se dividen en dos partes principales. Un sistema de inyección, que es el encargado de introducir el metal en el molde, y un sistema de cierre, que mantiene las dos mitades del molde selladas durante la inyección, evitando la salida de metal fundido al exterior.

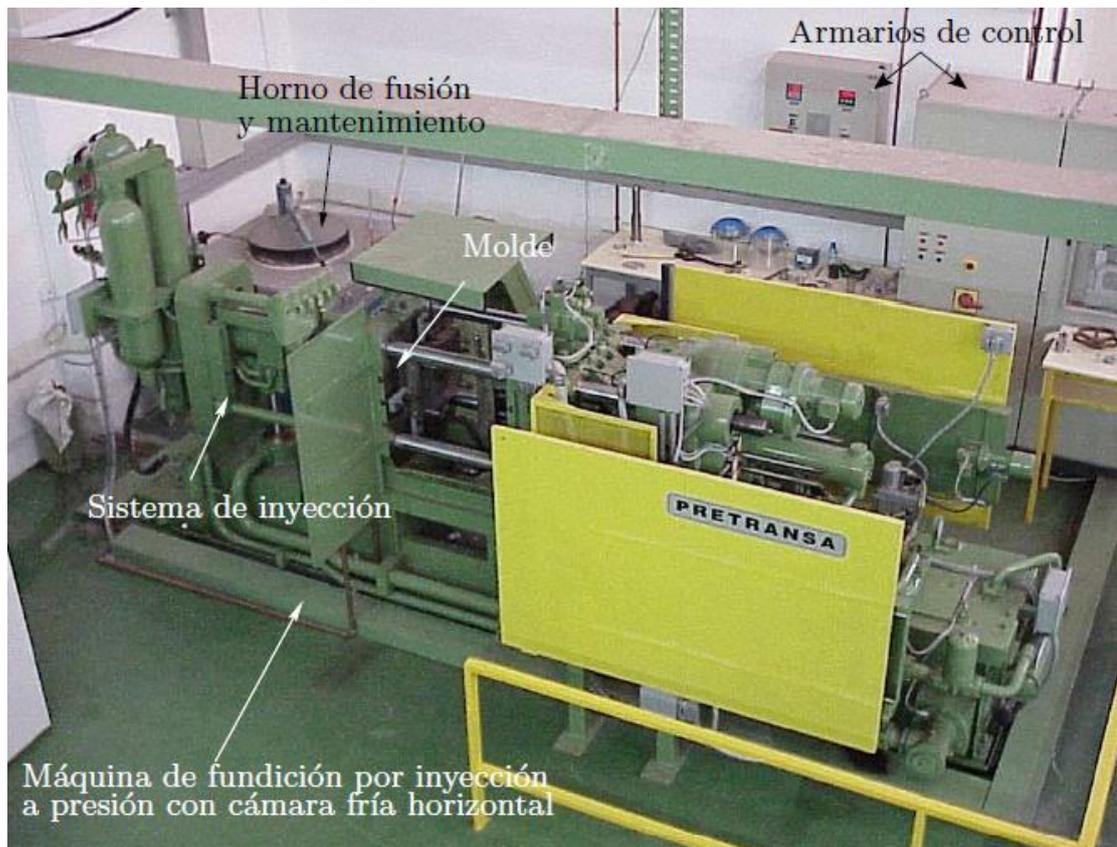


Figura 1.1 Horno de fusión y máquina FIAP del taller de la UPCT [14]

La máquina de cámara fría horizontal se utiliza principalmente para trabajar con aleaciones aluminio, magnesio o cobre [4]. La carga se suministra a la máquina mediante un cucharón o un sistema automático de vertido, que toma el metal fundido del horno y lo introduce en la cavidad del sistema de alimentación de la máquina. A diferencia de las máquinas en cámara caliente, los componentes de la misma no se encuentran sumergidos en el metal fundido.

Conforme el pistón de inyección avanza, obstruye la cavidad de llenado y conduce al metal fundido hasta el molde. Se trata de un proceso veloz, donde las presiones de inyección pueden llegar a alcanzar incluso los 20Mpa [15], durante el periodo de solidificación de la pieza.

Tras la solidificación del metal en el molde, las mitades que antes sellaban la zona de solidificación se separan, dejando libre a la pieza. Para poder obtenerla, se hace uso de un sistema de eyectores colocado sobre la parte móvil de la máquina, que se activa tras la separación de las mitades del molde. Esto empuja la pieza, separándola de su posición previa.

1.2.2 Producción de moldes

Los moldes son normalmente producidos por trabajo en caliente o fundición y están fabricados con acero martensítico o, en menor medida, de metales refractarios. Éstos tienen una gran resistencia mecánica y a la temperatura.

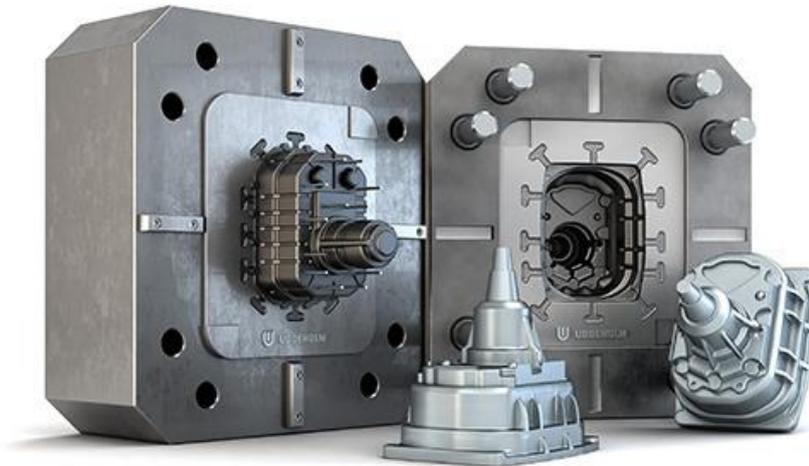


Figura 1.2 Ejemplo de molde y pieza formada [22]

Debido al uso para el que serán destinados, la precisión a la hora de su fabricación es muy importante. Su maquinado y fabricación presentan un precio muy elevado, pero los moldes pueden llegar a ser reutilizados incluso cientos de miles de veces. Llevan incorporados una cavidad por la que el metal será introducido desde la cámara de inyección hacia el interior del molde (canal de colada), y un espacio para poder acoplar una de las mitades del molde al sistema de eyección. También posee rebosaderos, para evitar los excesos de metal fundido, y vientos, que son pequeños espacios situados normalmente al final del molde, por los que el aire atrapado en el mismo será evacuado tras la inyección del metal en su interior, reduciendo así la presencia de aire y por tanto la porosidad [3], [16].

La pieza de metal solidificado, al ser eyectada, no se expulsa con su forma final, sino que también se solidifica una parte del aluminio en los rebosaderos y el canal de colada que presenta el molde. Sin embargo, únicamente la pieza será utilizada, por lo que tanto rebosaderos, como canales de colada, y otras imperfecciones que afecten a la calidad superficial de la pieza, deberán ser eliminados. Estos podrán ser eliminados manualmente, por ejemplo con unas tenazas, o con un baño en agua que elimine los restos más débiles.

Alrededor del molde se encuentran unos conductos llenos de líquido refrigerante, lo que permitirá la solidificación más rápida de la pieza, además del control de la temperatura del molde.

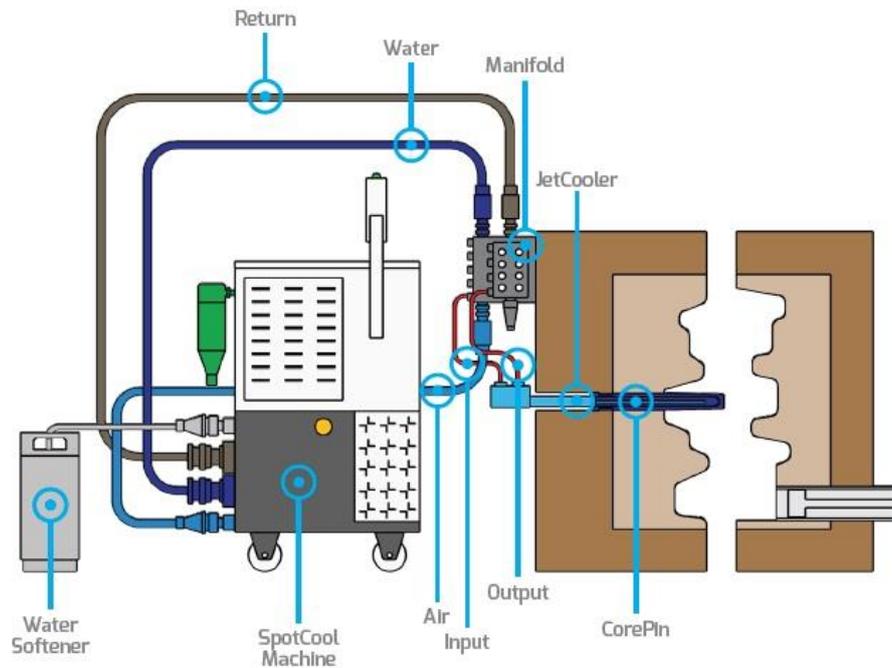


Figura 1.3 Sistema de refrigeración de la máquina FIAP [23]

1.2.3 Partes y características

Se trabajará con la máquina disponible en el Taller de Fabricación de la UPCT. Esta máquina se refrigera mediante un circuito abierto de agua. Además, la zona del pistón-contenedor se encuentra debidamente lubricada para evitar los desgastes que pudiesen ocasionar los fenómenos de fricción durante el proceso de fabricación.

Aunque muchas máquinas de este tipo poseen un método automático de vertido del metal, desde el horno hacia la cavidad que lleva a la cámara de inyección, por motivos económicos, este no es nuestro caso y se utiliza una cuchara que permite a un operario introducir una cantidad de metal determinada en la cámara. No obstante, para el estudio que se va a realizar esto no será un problema, aunque es evidente que un proceso automatizado presentaría menos defectos que el sistema explicado. Es de interés destacar que la limpieza del horno no queda olvidada en el proceso. Las impurezas que podría ocasionar la suciedad también son un factor a tener en cuenta a la hora de la producción. Se limpiarán los residuos que queden en la superficie con una espumadera, y los incrustados en el interior, gracias a un producto químico que los disolverá y elevará a la superficie donde nuevamente podrán ser retirados a mano.

Esta máquina está compuesta por tres partes principales: Un sistema de sujeción y cierre del molde un sistema de inyección y por último un sistema de control.

1.2.3.1 Elementos del sistema de sujeción y cierre del molde

- Platos de sujeción: Uno fijo y otro móvil.

- Sistema mecánico de cierre: Se encarga tanto del movimiento del plato móvil como del desplazamiento de la placa de expulsores.
- Sistema hidráulico: Generará la presión necesaria en los dispositivos de cierre del molde para asegurar que queda completamente sellado el sistema.

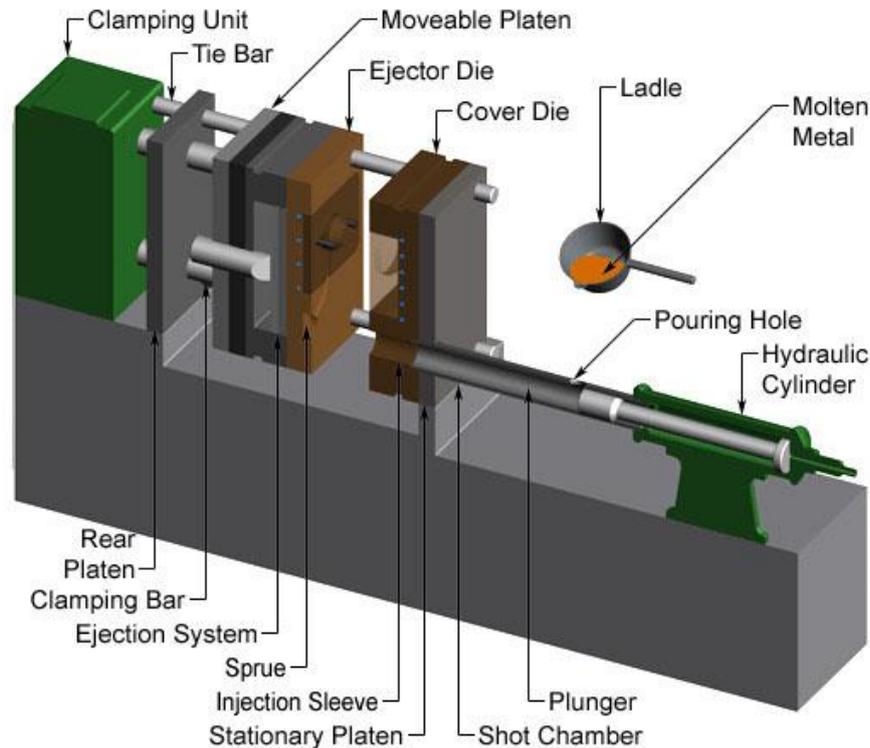


Figura 1.4 Elementos del sistema de sujeción y cierre del molde. Sistema hidráulico [24]

En el plato de sujeción fijo existe un agujero por el que se introducirá en la inyección, gracias al desplazamiento del pistón, el metal fundido en el molde. El plato móvil se une al fijo, creando la forma definitiva del molde y quedando totalmente apretado contra él, sellando y asegurando que ninguna gota de metal salga por una ranura.

El accionamiento del sistema hidráulico activa una bomba hidráulica que generará la presión necesaria para proporcionar la fuerza requerida por el sistema de sellado del molde, mediante la presión generada por el aceite que expulsa la bomba en la cara del pistón hidráulico, empujándolo.

El molde está compuesto de las partes que se muestran en la Figura 1.5. Los rebosaderos tienen la función de acumular el metal sobrante en la inyección, además de otros desperfectos e impurezas que pueda haber presentes, y los vientos son los encargados de permitir la evacuación de aire al ambiente, evitando así en gran medida la formación de porosidad.



Figura 1.5 (a) Molde disponible en la UPCT e **(b)** insertos mecánicos intercambiables empleados para modificar la geometría del sistema [14]

1.2.3.2 Elementos del sistema de inyección

- Bomba que proporciona la presión necesaria y un caudal constante de aceite al sistema de inyección.

Este sistema es el encargado de accionar el pistón durante el proceso de inyección. Trabaja caracterizado por tres fases que se explicarán en el apartado 1.2., no obstante, se menciona el procedimiento de las mismas:

- PRIMERA FASE:

Se abre la válvula de inyección → La presión se transmite al pistón, desplazando el émbolo unido al cilindro que está en contacto con el metal fundido presente en la cámara de inyección.

- SEGUNDA FASE:

Es necesario un exceso de presión para aumentar la velocidad → Entra en acción el acumulador de nitrógeno seco.

- TERCERA FASE:

Para incrementar la presión, necesaria para reducir la porosidad en la pieza durante la solidificación, se utiliza un cilindro multiplicador.



Figura 1.6 Bomba que proporciona la presión al sistema de inyección [25]

1.2.3.3 Elementos del sistema de control

El sistema de control está constituido por un panel de operaciones, que puede ser manejado por el usuario, un PLC, que controla las variables de entrada y de salida, y de transductores de posición y presión que nos permiten conocer las características del sistema en cada ocasión. Este sistema además activa los elementos del sistema de inyección.

Se controla gracias a dos aplicaciones informáticas [14]:

- Programa de control de máquina (PCM): Configura el PLC para regular tanto el tiempo que el molde permanecerá cerrado, como el porcentaje de apertura de la válvula que proporciona la presión necesaria al pistón, la posición del mismo, etc. En definitiva, controla los elementos mecánicos del sistema.
- Programa de control de la inyección (PCI): Captura y evalúa los datos digitales de posición del pistón durante la inyección y genera representaciones gráficas frente al tiempo. Únicamente recibe y procesa datos, no interviene en el proceso de producción.

1.3 Fases del proceso de inyección

El proceso de inyección se compone de tres fases principales: movimiento lento del pistón, movimiento rápido del pistón e intensificación de la presión. Esto es así con el fin

de minimizar la porosidad de la pieza fabricada, evitando el atrapamiento de aire durante el movimiento del metal líquido.

1.3.1 Fase lenta

En primer lugar, el metal fundido procedente del horno de fusión es introducido en la cámara de inyección, llenándola parcialmente. Este llenado parcial es muy importante a la hora del estudio de la porosidad.

Tras esto, comienza el desplazamiento del pistón a una velocidad constante, empujando el metal hacia el molde. Este desplazamiento continúa lentamente hasta que la cámara de inyección está totalmente llena de líquido, sin espacio para el aire (idealmente) y alcanzando el techo de la cavidad, quedando a un último empujón de entrar en el espacio del molde propiamente dicho.

Las características de la fase lenta pueden enumerarse a continuación [1]:

- El pistón empuja el líquido durante un tiempo, hasta que el metal alcanza el techo de la cámara y la llena por completo.
- El proceso es realizado a velocidad constante.
- Se forma una ola en el interior de la cavidad debida al movimiento del pistón.
- El objetivo de esta fase es que la ola alcance el techo de la cámara de inyección sin sufrir una rotura para reducir la porosidad.

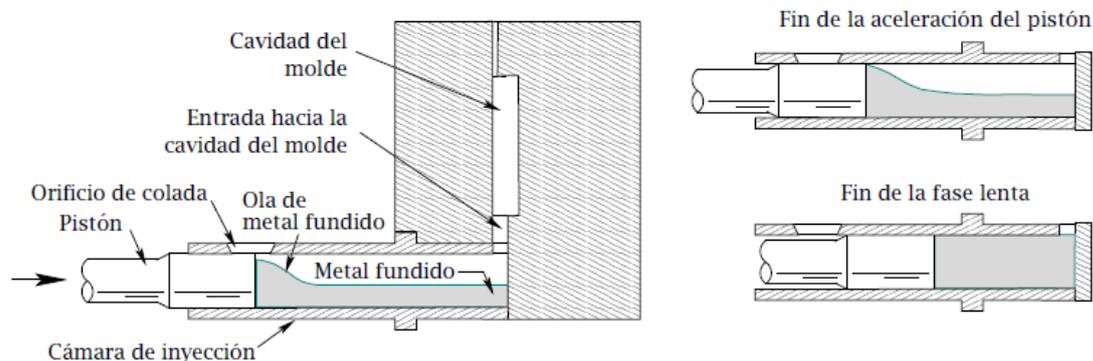


Figura 1.7 Fase lenta [1]

Durante esta fase, se presenta un concepto muy importante en el estudio del movimiento del pistón y la porosidad. El concepto de velocidad crítica. Puede definirse la velocidad crítica como la velocidad objetivo del proceso. Si el pistón supera esta velocidad, la ola podría reflejarse en el techo, rompiendo y atrapando aire, lo que ocasionaría la porosidad que tratamos de reducir. Si por el contrario el pistón no alcanza la velocidad crítica, la ola podría reflejarse ahora en la pared final, rompiendo y almacenando también aire en su interior [1], [14].

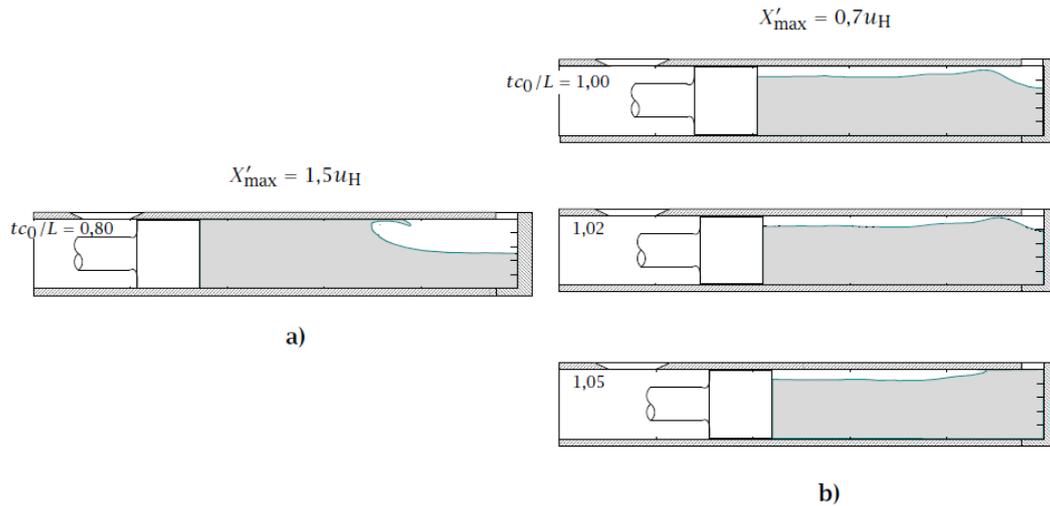


Figura 1.8 a) Velocidad del pistón superior a la velocidad crítica u_H b) Velocidad del pistón inferior a la velocidad crítica [1]

1.3.2 Fase rápida

Esta fase tiene una duración menor en el tiempo que la fase lenta. Comienza inmediatamente después de la finalización de la fase lenta. Aquí se produce un gran aumento de la velocidad del pistón, empujando el líquido hacia la cavidad de entrada al molde hasta llenarlo por completo.

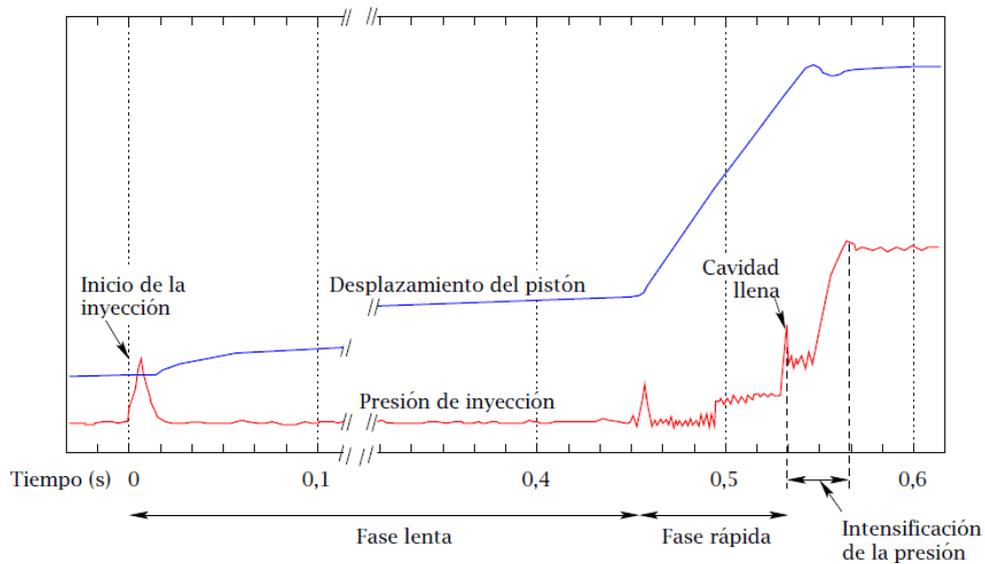


Figura 1.9 Representación gráfica de las diferentes fases del proceso [1]

1.3.3 Fase de intensificación de la presión

Tras el llenado del molde, se eleva la presión aplicada al pistón y se mantiene en un valor determinado hasta que solidifica totalmente la pieza. Esto es así para obtener la estanqueidad del molde, reduciendo la porosidad de la pieza. Esta presión idónea produciría una evacuación de aire por los vientos óptima.

No hay que confundir esta presión con la presión dinámica durante el llenado del molde, que tiende a incrementar los niveles de porosidad. Sin embargo, como se ha comentado, los incrementos de la presión estática durante la solidificación tienden a disminuirla.

CAPÍTULO 2: MÉTODO PQ2

El método PQ² es utilizado para conseguir la optimización de los parámetros de la máquina, y con ello, una reducción de la porosidad en la pieza final. A partir de unas líneas características del método, que van a ser explicadas a lo largo de este capítulo, es posible definir una combinación de valores de trabajo determinados, con los cuales se obtiene una reducción del aire atrapado.

¿Qué se va a realizar para optimizar el proceso? En primer lugar, es necesario caracterizar la máquina y el molde, así como las propiedades del metal empleado. En principio, dichos parámetros se considerarán definidos. Se va a tratar entonces de optimizar el proceso variando tanto las características geométricas como motrices del sistema cilindro-pistón.

Las tres variables principales del proceso que se van a considerar son:

Tiempo de llenado: Tiempo necesario para que el metal llene el molde.

Velocidad de puerta: Velocidad a la que el metal entra al molde.

Presión final del metal: Presión que aplica el pistón durante la fase de solidificación.

Se debe también tener en cuenta que hay distintos métodos para reducir el aire atrapado en el metal [6], entre los que se pueden destacar:

- Aceleración del cilindro:

Es conocido que una parte de aire que se debe extraer del conjunto cámara-molde se encuentra en la cámara de inyección tras verter el metal con la cuchara de colada. El porcentaje de llenado es siempre inferior al 100% por lo que suele haber una cantidad de aire considerable. El objetivo de la fase lenta del movimiento del pistón es el de empujar la mayoría del aire presente hacia el molde y posteriormente a través de los vientos.

A una velocidad de desplazamiento óptima, podría eliminarse el aire de la cámara de inyección y no se produciría una turbulencia causante del atrapamiento del aire. Además, la aceleración que lleva el cilindro desde la posición de reposo hasta esta velocidad óptima es un parámetro muy importante que ha de ser estudiado [7].

- Vacío:

El objetivo de la aplicación de vacío sería el de disminuir el aire presente en la cámara de llenado durante la inyección. Este sistema sería más eficiente que el de los vientos porque se reduce la presión ambiente y porque la superficie de salida del aire es mayor en la válvula de vacío que en los vientos. En cualquier caso, requiere de una instalación específica e incrementa los costes de los equipos necesarios.

- Método PoreFree:

En el método *PoreFree* se utiliza oxígeno para purgar la cavidad de aire, previo a la inyección del metal. El oxígeno reacciona con el aluminio fundido formando alúmina, que reduce la porosidad drásticamente, a cambio de formar un nuevo compuesto en la aleación. Es un proceso más caro, aunque se obtienen materiales con mayores propiedades mecánicas.

Para poder obtener los parámetros óptimos del sistema, será necesario trabajar con un proceso iterativo experimental. Se variarán los parámetros de entrada hasta obtener una solución lo más optimizada posible. En cualquier caso, el proceso de optimización ha de seguir un desarrollo coherente.

2.1 Conceptos del sistema

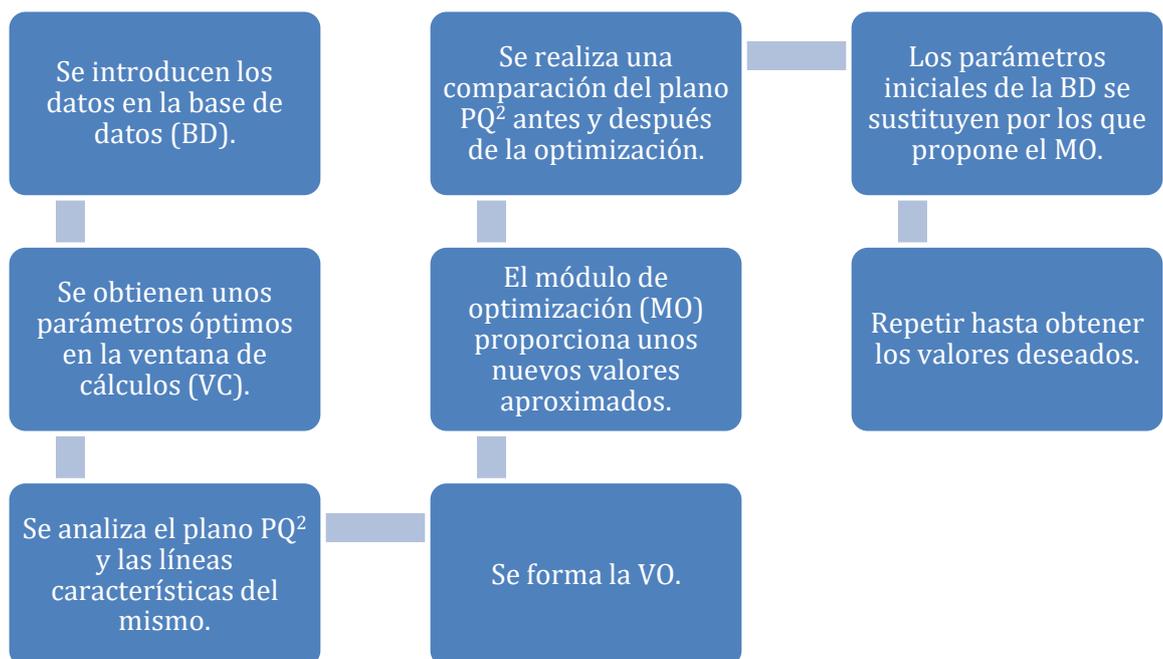
La máquina con la que se va a trabajar posee un sistema que le permite variar las propiedades de sus variables, como ya se comentó en el Capítulo 1, gracias al sistema de control. Las partes más importantes son [6]:

- *Ventana operacional (VO)*: Es una representación gráfica de los límites de las variables que describen el proceso (tiempo de llenado y velocidad de puerta). Si no se conocieran estos límites, se obtendrían piezas de menor calidad. Estos

límites son una primera aproximación y han de ir reajustándose conforme avanza el estudio de optimización.

- *Base de datos (BD)*: Contiene toda la información del proceso.
- *Ventana de cálculos (VC)*: Realiza los cálculos necesarios para obtener los parámetros óptimos de área de puerta y diámetro de cilindro (valores de salida).
- *Módulo de optimización (MO)*: Es el encargado de emplear las ecuaciones de optimización, utilizadas para la obtención de los parámetros óptimos de entrada.

El proceso podría ser resumido con el siguiente esquema:



2.2 Líneas características del método

Se va a realizar a continuación una explicación del método analítico aproximado que permite la obtención de los parámetros óptimos de la geometría del sistema. Se trata del método P-Q².

En primer lugar, hay que definir las suposiciones hechas para la construcción del método [7]. Estas son:

- C_d se asume como constante y depende únicamente del tipo de metal empleado.
- Se pueden simplificar varios términos en la ecuación de Bernoulli.
- Todo el metal empujado a través de la cámara de inyección atravesará la puerta de entrada al molde.

- No hay gas dentro del metal líquido.
- No ocurre la solidificación del metal durante el proceso de llenado.
- La principal oposición al flujo del metal sucede en el conducto previo a la puerta de entrada.
- Hay una relación lineal entre la presión y el caudal al cuadrado.

Todos los términos expresados en las suposiciones anteriormente mencionadas serán explicados a lo largo del presente capítulo.

El procedimiento es relativamente sencillo: a partir de unas variables de entrada, como son: volumen del molde, la presión del acumulador y el área del pistón, y velocidad de puerta, será posible determinar unas ecuaciones características de cada máquina y molde; a partir de las cuales se pueden obtener unos parámetros que permitirán optimizar el proceso.

La secuencia de cálculo [6] comienza por la determinación de la línea de máquina. El siguiente paso es el de determinar la línea de molde. Finalmente, se determina la línea de funcionamiento de máquina. Esta curva es una manera gráfica de comprender la potencia que es capaz de alcanzar la máquina. Estas líneas, como veremos a continuación, proporcionan una imagen intuitiva de la capacidad de fabricación de una máquina en concreto para una pieza específica.

El método se basa en un balance de energía [4], estableciendo que la pérdida de carga en la inyección es proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo. La base teórica de este método es la conservación de la energía para un flujo incompresible. La energía del fluido a la entrada tiene que ser igual a la energía del fluido a la salida, más las pérdidas. Esto puede expresarse como:

$$E_e = E_s + \text{Pérdidas} \quad (2.1)$$

Donde E_e es la energía del fluido a la entrada, E_s es la energía del fluido en el conducto de salida y las pérdidas son las pérdidas totales del proceso.

La ecuación anterior puede expresarse en función de presión (P), densidad (ρ) y velocidad (v), adoptando la forma siguiente, conocida como ecuación de Bernoulli [7]:

$$\frac{P_e}{\rho} + \frac{1}{2}v_e^2 + gz_e = \frac{P_s}{\rho} + \frac{1}{2}v_s^2 + gz_s + \text{Pérdidas} \quad (2.2)$$

Donde P_e es la presión a la entrada, P_s la presión a la salida, v_e la velocidad a la entrada y v_s la velocidad del fluido a la salida. El término de gz_e puede ser despreciado ya que las diferencia de alturas ($z_e - z_s$) no es significativa entre los puntos.

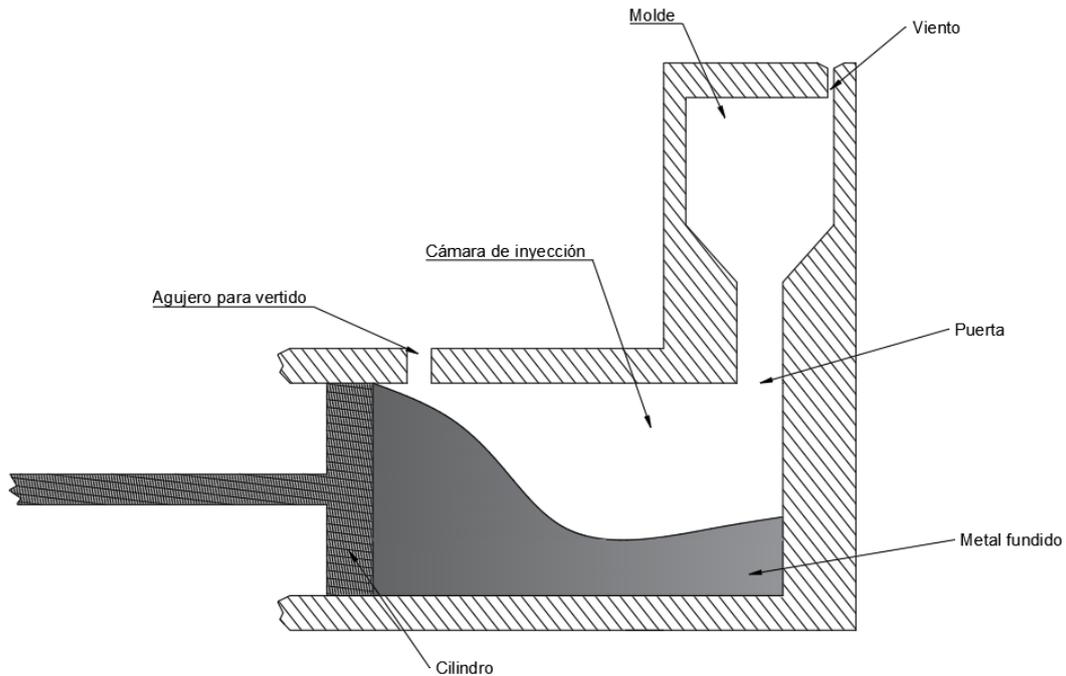


Figura 2.1 Esquema del sistema

En la figura se puede ver el sistema de flujo que se utiliza en el proceso de fabricación. Las pérdidas de energía que se producen por el flujo del metal fundido a través de la cámara de inyección y de la puerta son debidas, principalmente, a la fricción y a cambios de geometría.

Dado que el metal tiene una naturaleza no homogénea [6], sus componentes no viajan al mismo ritmo ni en la misma dirección a través de la cámara, causando turbulencia en el torrente de flujo. Las altas velocidades utilizadas para inyectar el metal en el proceso de fabricación, junto con otras condiciones como la rugosidad de la superficie, contribuyen a generar dicha turbulencia.

La ecuación (2.2) puede expresarse como sigue, incluyendo las pérdidas en una constante C , y asumiendo la velocidad de entrada (v_e) como 0.

$$P_e - P_s = Cv^2 \quad (2.3)$$

Donde C es una constante, que depende de las características y propiedades del fluido, P_e es la presión de entrada, P_s la presión de salida y v la velocidad de salida.

2.2.1 Línea de máquina (LMA)

Aplicamos pues la ecuación de la energía (2.1) al sistema de inyección que se muestra en la Figura 2.2.

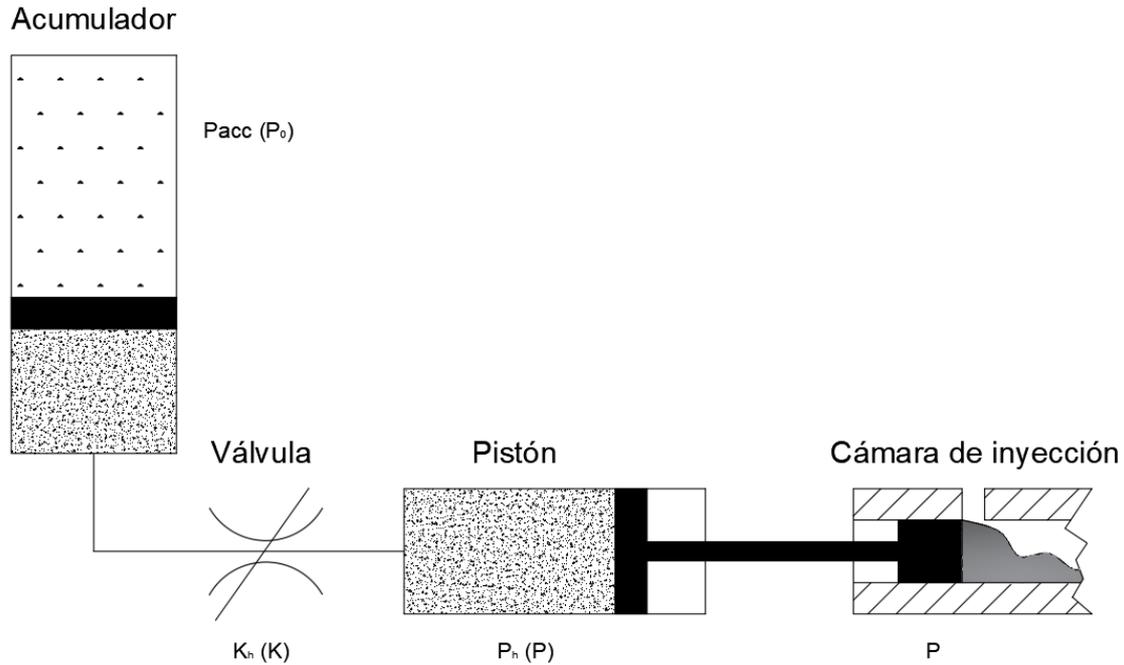


Figura 2.2 Esquema sistema de inyección

Se puede ver que el acumulador proporciona una presión adicional (P_{acc}) a la presión del pistón (P_h) para acelerar su movimiento. Esta presión se transmite a través de una válvula caracterizada por una constante determinada (K_h).

Por lo tanto, es posible utilizar la ecuación (2.3) para este caso específico, tomando la presión hidráulica como la presión de salida, la presión del acumulador como la presión de entrada y la constante de pérdidas, K_h , sustituyendo a la constante C .

$$P_h = P_{acc} - K_h v^2 \quad (2.4)$$

La presión hidráulica es proporcional a la presión del metal en la cámara de inyección por una relación entre el área del pistón (A_p) y el área del cilindro (A_c). Esto puede deducirse mediante un sumatorio de fuerzas. En el caso que nos ocupa, tenemos que:

$$P_h A_c = P A_p \rightarrow P_h = P \frac{A_p}{A_c} \quad (2.5)$$

Además, se sabe que la velocidad del flujo puede expresarse en el caso de flujo incompresible fácilmente en términos de caudal conociendo la sección atravesada por el flujo $Q = vA$.

Pueden definirse dos nuevas variables:

$$P_0 = P_{acc} \frac{A_p}{A_c} \quad (2.6)$$

$$K = \frac{K_h}{A_c^2} \quad (2.7)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.5), (2.6) y (2.7) en la expresión (2.4) y conociendo la relación Caudal – Velocidad, se obtiene:

$$P = P_0 - K * Q^2 \quad (2.8)$$

Se puede ver que, gracias a los cambios realizados, se ha obtenido una expresión que es dependiente de la presión y del caudal, como anticipa el título del método de selección que se está estudiando en el presente capítulo. Ahora, se podrá representar gráficamente las diferentes líneas características del proceso en el plano PQ^2 .

La ecuación (2.8) define la línea de máquina (L_{Ma}) como una línea recta en el plano PQ^2 . Presenta una ordenada en el origen P_0 , una pendiente K y corta el eje de abscisas (Q^2) en el punto de presión cero con el máximo caudal (Q_0^2). Cabe destacar que se emplean unidades cuadradas del caudal para obtener una mayor facilidad a la hora de la representación gráfica.

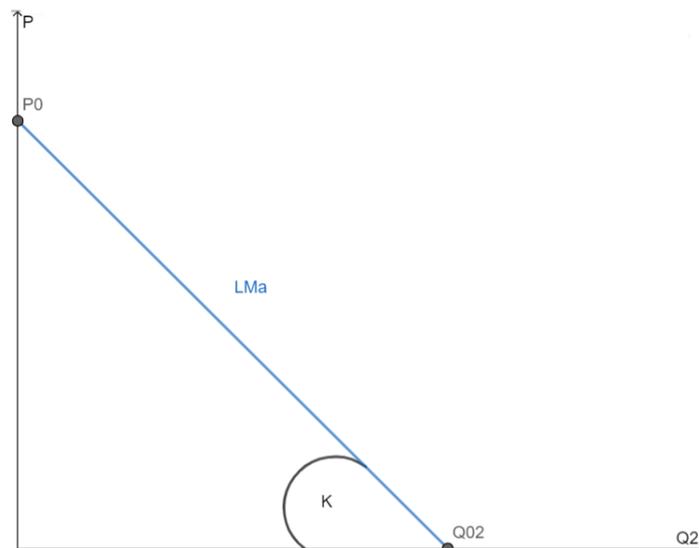


Figura 2.3 Línea de máquina en el plano PQ^2

Como ya se ha dicho, la línea de máquina es una recta de pendiente negativa que corta en P_0 y Q_0^2 . Para comprobar cómo afecta el área del cilindro (pistón de inyección), las ecuaciones (2.11) y (2.12) son empleadas, obteniendo diferentes líneas de máquina. En la Figura 2.4 se muestran tres líneas de máquina, siendo la de mayor área de cilindro la L_{Ma1}, seguido de la L_{Ma2} y por último la L_{Ma3}.

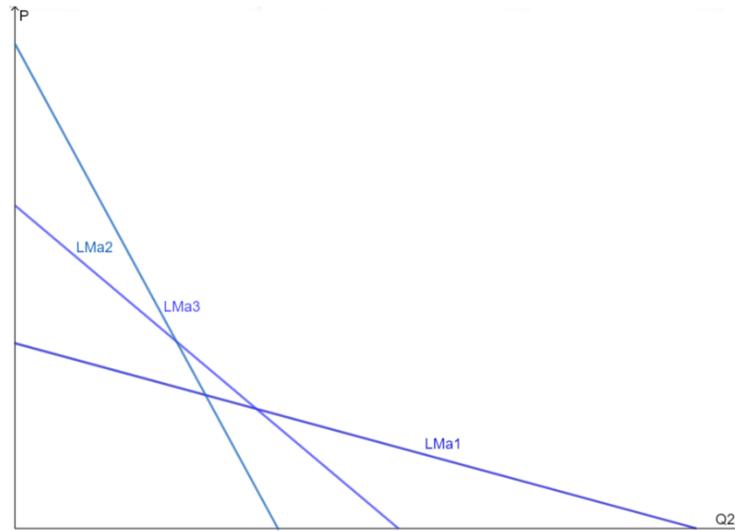


Figura 2.4 LMa para diferentes valores de diámetro de cilindro

Se puede ver que, a mayor área de cilindro, menor será la pendiente de la línea de máquina.

Por otro lado, el cambio en la presión del acumulador también va a modificar la línea de máquina, como se muestra en la Figura 2.5, cambiando los puntos de corte con el sistema sin variar la pendiente. $P_{acc} LMa2 > P_{acc} LMa1$.



Figura 2.5 LMa para diferentes valores de presión del acumulador

2.2.2 Línea de molde (LMo)

El siguiente paso en el proceso de cálculo es el de la determinación de la línea de molde (LMo). Se trata de una ecuación cuya representación gráfica es una línea que

caracteriza las propiedades del molde de la pieza. Es un desarrollo similar al de la línea de máquina, pero ahora aplicado al flujo del metal fundido a través de la puerta.

La pérdida de energía expresada en las ecuaciones (2.1) y (2.2) puede expresarse en términos de la velocidad de puerta (salida) como [9]:

$$Pérdidas = K_h \frac{v_g^2}{2} \quad (2.9)$$

Con el concepto de conservación de la masa, la ecuación (2.2) y la ecuación (2.3) puede definirse entonces:

$$v_g = C_d \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (2.10)$$

Asumiendo que la presión en el molde es aproximadamente cero (antes de la etapa de incremento de la presión). Con las expresiones anteriores y la definición de caudal, se puede escribir la siguiente ecuación¹ [13]:

$$P = \frac{\rho}{2C_d^2 A_g^2} Q^2 = C Q^2 \quad (2.11)$$

Donde P y Q son las mismas que las definidas anteriormente, C_d es una constante característica de cada molde y material (normalmente, para el aluminio esta constante tiene un valor de 0.5 [4], [7], [8]), A_g es el área de puerta, parámetro que trataremos de obtener y ρ es la densidad del metal.

Esta ecuación define la línea de molde como una línea recta que parte desde el origen, con una pendiente C :

¹ Si se trabajase con el sistema anglosajón de unidades (Psi y Pulgadas) habría que añadir un término de gravedad ($g = 386.22 \text{ in/s}^2$) en el denominador a la derecha del igual, para realizar el paso de unidades de Pascales a Libras por pulgada cuadrada de manera adecuada.

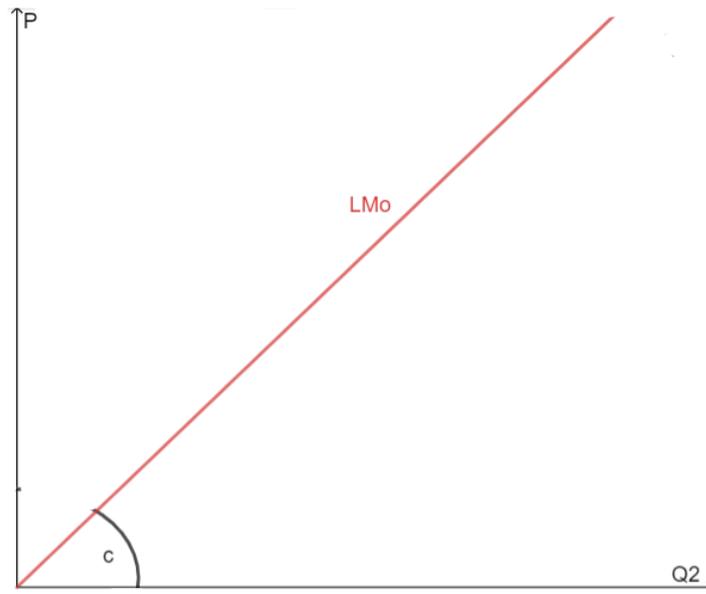


Figura 2.6 Línea de molde en el plano PQ2

2.2.3 Línea de funcionamiento de máquina (LFM)

Como ya se ha comentado en el apartado de la línea de máquina, se pueden representar muchas LMa para una misma máquina únicamente variando el diámetro del cilindro. Del conjunto de todas ellas podemos obtener la LFM, que se define como la línea tangente a todas las LMa existentes, desde diámetro de cilindro nulo hasta infinito [6]. Se trata de una curva hiperbólica, que es función de la presión en el acumulador, la velocidad máxima del cilindro y el área del pistón. Es independiente de cualquier diámetro de cilindro.

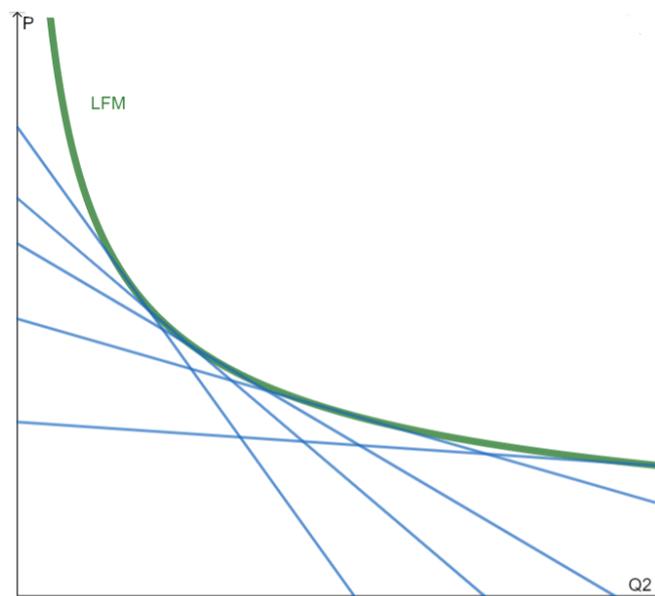


Figura 2.7 LFM creada a partir de la tangencia a todas las LMa posibles

La velocidad máxima de cilindro se mide cuando no hay metal en la cámara de inyección. Depende principalmente de la fricción del sistema hidráulico (K_h) y de la presión del acumulador. Suponiendo que la fricción mecánica en el cilindro y en el pistón son despreciables, puede obtenerse la velocidad máxima v_m cuando se sustituye $P_h = 0$ en la ecuación (2.4).

El área bajo la curva LFM cubre todos los puntos en los que la máquina podría funcionar. Por encima de la LFM la potencia de la máquina FIAP no alcanzaría los requerimientos. Esto es así ya que la línea de funcionamiento de máquina marca los puntos para una presión de acumulador máxima. Es decir, la presión límite que es posible proporcionar al pistón.

2.2.3.1 Obtención de la constante de la hipérbola

La LFM es una curva hiperbólica, definida de la siguiente manera:

$$P = \frac{a}{(Q^2)^{0.5}} \quad (2.12)$$

Donde a es la constante de la hipérbola, ahora objetivo de estudio.

Cada ML corta los ejes en unos puntos definidos como Q_0, P_0 :

$$Q_0 = v_m A_c \quad (2.13)$$

$$P_0 = \left(\frac{D_p}{D_c}\right)^2 P_{acc} \quad (2.14)$$

Se trata de los puntos límite del sistema. Q_0 se obtiene cuando no hay presión en el sistema, y puede producirse un flujo sin restricción del metal. P_0 es la presión del acumulador multiplicada por la relación de áreas, como ya se definió anteriormente.

La hipérbola será tangente a cada LMa en un punto (P_n, Q_n^2) , Figura 2.8. Las pendientes en este punto son iguales por la condición de tangencia.

La pendiente de la LFM (2.15) y la ecuación de la LMa (2.16) de este ejemplo son:

$$\frac{dP}{d(Q^2)} = -\frac{a}{2(Q_n^2)^{3/2}} \quad (2.15)$$

$$P = -\frac{a}{2(Q_n^2)^{3/2}} Q^2 + b \quad (2.16)$$

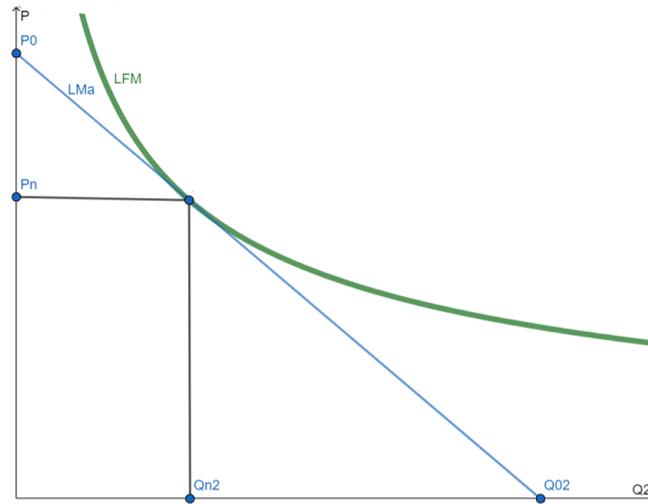


Figura 2.8 LFM y LMa

Sustituyendo el punto (P_n, Q_n^2) en las ecuaciones (2.12),(2.16) se obtiene:

$$P_n = \frac{a}{(Q_n^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.17)$$

$$P_n = -\frac{a}{2(Q_n^2)^{\frac{3}{2}}} Q_n^2 + b \quad (2.18)$$

De donde se puede resolver y obtener las constantes a y b:

$$a = P_n(Q_n^2)^{1/2} \quad b = \frac{3}{2}P_n \quad (2.19)$$

Y la ecuación de la LMa:

$$P = \frac{P_n}{2} \left(-\frac{Q^2}{Q_n^2} + 3 \right) \quad (2.20)$$

Esta línea cruza por los puntos $(0, P_0), (Q_0, 0)$ en:

$$\text{en } Q = 0 \rightarrow P = P_0 = \frac{3}{2}P_n \quad (2.21)$$

$$\text{en } P = 0 \rightarrow Q^2 = Q_0^2 = 3Q_n^2 \quad (2.22)$$

La constante a de la LFM puede ahora ser calculada en términos de los parámetros de la máquina con las ecuaciones (2.13), (2.14), (2.19), (2.21) y (2.22) y ser reescrita con la definición de velocidad máxima:

$$a = \frac{2\sqrt{3}}{9} A_p \frac{(P_{acc})^{3/2}}{K_h^{1/2}} \quad (2.23)$$

La LFM queda ahora definida completamente. La constante de la hipérbola tiene unidades de potencia. Representa la energía almacenada en el acumulador cargado y liberada al metal fundido a través del sistema hidráulico en la fase de inyección.

Se define entonces la LMa en función del parámetro a como:

$$P = P_0 \left(1 - \frac{4}{27} \frac{P_0^2}{a^2} Q^2\right) \quad (2.24)$$

2.2.4 Ventana Operacional. Conversión de los ejes

Hasta ahora se han definido las tres curvas características del método PQ^2 . Gracias a estas funciones es posible obtener los parámetros del sistema para alcanzar un proceso óptimo de fabricación (el diámetro del cilindro y el área de la puerta).

No obstante, hay que tener en cuenta los límites de las variables que determinan la ventana operacional (VO) definida en el apartado 2.1, es decir, los tiempos de llenado y las velocidades de puerta. Estos límites están definidos por unos valores máximos y mínimos, cuya determinación será explicada con detenimiento más adelante.

Estas variables no poseen unidades de presión y caudal y por lo tanto no pueden implementarse de manera directa en el plano PQ^2 en el que se desarrolla el método con el que se está trabajando. Para poder analizar la VO dentro de este plano, es necesaria una conversión de sus unidades (tiempo y velocidad) a unidades de presión y caudal cuadrado. Esta conversión se realiza a través de una función de equivalencia:

A partir de la ecuación (2.11) es posible definir:

$$Q^2 = A_g^2 v_g^2 \quad (2.25)$$

Y con ello, transformar la velocidad de puerta a la escala de presión:

$$P = \frac{\rho}{2} \left(\frac{v_g}{C_d}\right)^2 \quad (2.26)$$

Y el tiempo de llenado a escala Q^2 como:

$$Q^2 = \left(\frac{V_m}{t_f}\right)^2 \quad (2.27)$$

Siendo V_m el volumen total del molde, incluyendo tanto los rebosaderos como el canal de colada y t_f el tiempo de llenado del molde. Nótese que, a mayor tiempo de llenado, menor caudal. Por lo tanto, hay que tener en cuenta que el eje de abscisas en unidades de caudal intersectará con el de ordenadas en el $(0,0)$, pero si se realiza la conversión a unidades de tiempo, intersectará en el $(\infty,0)$.

Para poder representar las restricciones de tiempo de llenado y velocidad de puerta en el gráfico PQ^2 , se representan los valores de tiempo y velocidad como caudal cuadrado y presión respectivamente. Se adjunta un ejemplo sencillo en el Anexo 2.1, en el que se muestra una gráfica $PQ^2-v_g t_f$.

Teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, se puede obtener una gráfica similar a la de la Figura 2.9, que muestra tanto la ventana operacional, como la LMa, LMo y LFM.

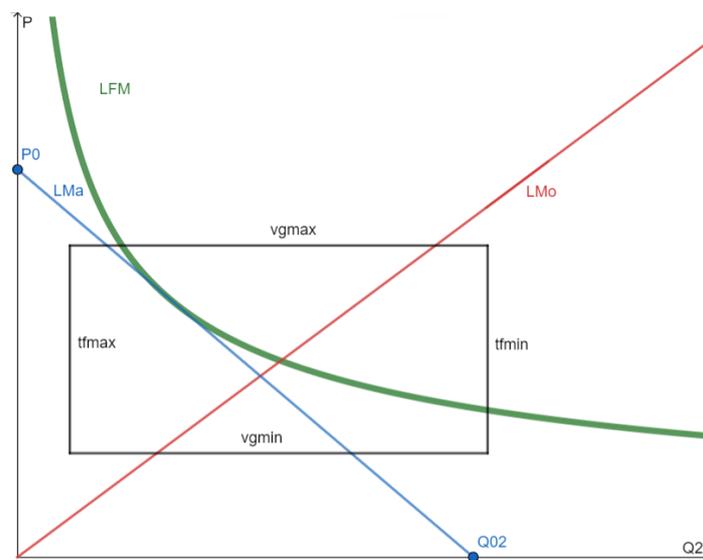


Figura 2.9 El plano PQ^2 al completo

El área bajo la LFM dentro de la VO representa el rango posible de variables de proceso, tiempo de llenado y velocidad de puerta, que permitirán determinar el punto de operación. Cualquier punto fuera de este rango no debería ser accesible.

El aumento de la presión del acumulador mueve la LFM a una posición superior, incrementando el rango posible, ya que la P_{acc} actúa directamente sobre la constante de la hipérbola como puede verse en la ecuación (2.23). Cuanto mayor es la constante de una hipérbola, más alejada del origen se encuentra esta.

2.3 Restricciones del método

En la sección anterior se ha explicado el método PQ^2 y el significado de sus líneas características. También se ha hablado de la ventana operacional, que define un rango de valores dentro de los cuales se debe trabajar, en busca del punto óptimo.

El objetivo de esta sección es encontrar unos valores que conformen dicha ventana operacional para poder aplicar el método.

Recordemos, por tanto, que la ventana operacional es un rectángulo de lados “tiempo mínimo de llenado”, “tiempo máximo de llenado”, “velocidad de puerta mínima” y “velocidad de puerta máxima”. También es de especial importancia el papel de la presión del acumulador, pero este valor es característico de la máquina y por tanto no será una restricción sino una variable.

2.3.1 Tiempo mínimo de llenado

El tiempo mínimo de llenado (t_{\min}) es el valor a partir del cual puede terminarse el proceso de llenado del molde. No es posible completar el proceso antes de este tiempo de una manera óptima ya que los vientos limitan la capacidad de extracción del aire del molde en función de su capacidad de ventilación [6].

Un viento puede representarse esquemáticamente como un conducto que conecta el interior del molde con el ambiente y puede ser estudiado como una tobera convergente-divergente, como muestra la Figura 2.10.

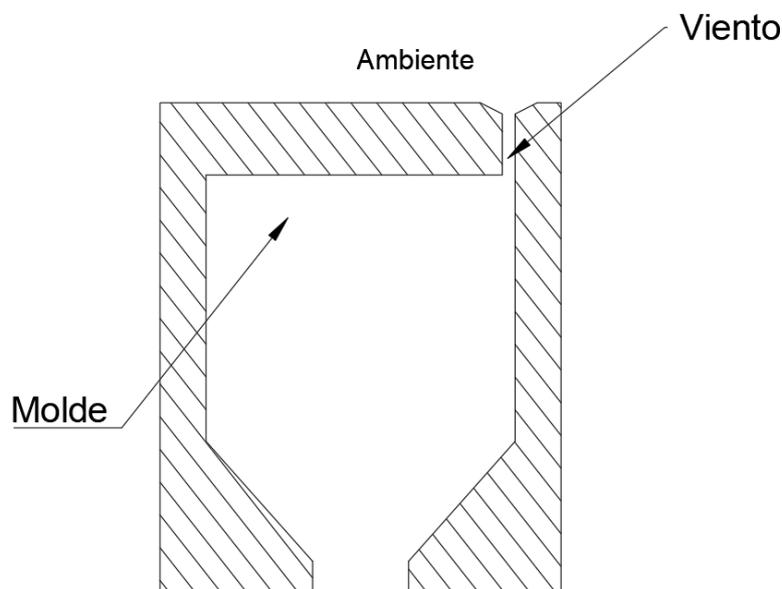


Figura 2.10 Esquema viento. Detalle Figura 2.1

Para comprender esto, es necesario estudiar el concepto del número de Mach. El número de Mach (M) se define como la relación entre la velocidad del aire (v_a) y la velocidad del sonido (v_{so}):

$$M = v_a/v_{so} \quad (2.28)$$

En el molde habrá una presión determinada, P_m . Por otro lado en el exterior se encuentra la presión ambiente, P_a . La relación de estas dos presiones tiene dos valores significativos:

- $\left(\frac{P_m}{P_a}\right)_{b.s.}$: Relación de bloqueo sónico.
- $\left(\frac{P_m}{P_a}\right)_{t.a.}$: Relación de tobera adaptada.

Con estas dos relaciones, se definen entonces 5 regímenes de funcionamiento del viento [12], en función del valor de su número de mach. Cabe decir que si $M < 1$, se trata de flujo subsónico. Si $M = 1$, se habla de flujo sónico. Y si $M > 1$, flujo supersónico, el cual generaría ondas de choque a la salida del viento.

1. $1 < \left(\frac{P_m}{P_a}\right) < \left(\frac{P_m}{P_a}\right)_{b.s.}$ Flujo subsónico, Mach siempre menor que 1.
2. $\left(\frac{P_m}{P_a}\right) = \left(\frac{P_m}{P_a}\right)_{b.s.}$ Relación de presiones de bloqueo sónico. El aire a la salida alcanzará su condición sónica.
3. $\left(\frac{P_m}{P_a}\right)_{b.s.} < \left(\frac{P_m}{P_a}\right) < \left(\frac{P_m}{P_a}\right)_{t.a.}$ Ondas de choque. Para presiones ambiente por debajo de la de bloqueo sónico, el flujo másico es crítico.
4. $\left(\frac{P_m}{P_a}\right) = \left(\frac{P_m}{P_a}\right)_{t.a.}$ Relación de presiones de tobera adaptada.
5. $1 < \left(\frac{P_m}{P_a}\right) < \left(\frac{P_m}{P_a}\right)_{t.a.}$ Expansiones que producen discontinuidades en el flujo.

El aire que se expulsa al ambiente a través de los vientos comienza su movimiento gracias al desplazamiento del pistón durante el llenado del molde. Debido a la diferencia de presiones entre el molde y el exterior, se produce una salida del aire por este conducto. La velocidad del aire, como se ha dicho, se mide con el número de Mach. Cuando la presión alcance un valor crítico, se desarrollarán ondas de choque, limitando la diferencia de presiones y estableciendo una velocidad máxima de la salida del aire al exterior. Se trata del caso 3. expuesto en el párrafo anterior.

La máxima diferencia de presiones se obtiene para flujo sónico. Cuando se alcanza el flujo supersónico debido a la excesiva velocidad del aire se desarrollan las ondas de choque mencionadas, disipando la presión sobrante para poder alcanzar la presión

ambiente lo antes posible. Puesto que la diferencia de presiones en el viento no puede aumentar más, la velocidad se mantiene constante.

El estudio de la capacidad de evacuación del aire interior del molde y cámara de inyección no es objeto de este trabajo. Sin embargo, se puede afirmar que está directamente relacionada con el tiempo mínimo de llenado (t_{fmin}). Cuanta más capacidad de evacuación se tenga, menor tiempo de llenado del molde es posible obtener. Esto es así debido a las características del flujo sónico, que impiden un aumento de la velocidad del flujo másico de aire a través del viento. Aunque se trate de acelerar el proceso, será imposible debido a las ondas de choque generadas, por lo que, como mínimo, el proceso tardará lo equivalente a un flujo de Mach igual a uno.

En lo que a este trabajo respecta, el tiempo mínimo de llenado, al igual que el resto de restricciones que se van a exponer en esta sección, no será calculado, sino tomado de aproximaciones proporcionadas por otros autores como dato de entrada.

2.3.2 Tiempo máximo de llenado

El tiempo máximo de llenado (t_{fmax}) establece un valor límite superior para el llenado del molde, ya que, si ese tiempo es sobrepasado, es posible que se produzcan solidificaciones prematuras en la pieza [1].

El análisis del tiempo de llenado se realiza suponiendo un flujo de calor unidireccional, una temperatura uniforme durante el proceso de llenado y una pérdida de calor lineal. Se va a estudiar un modelo similar al mostrado por el esquema de la figura 2.11.

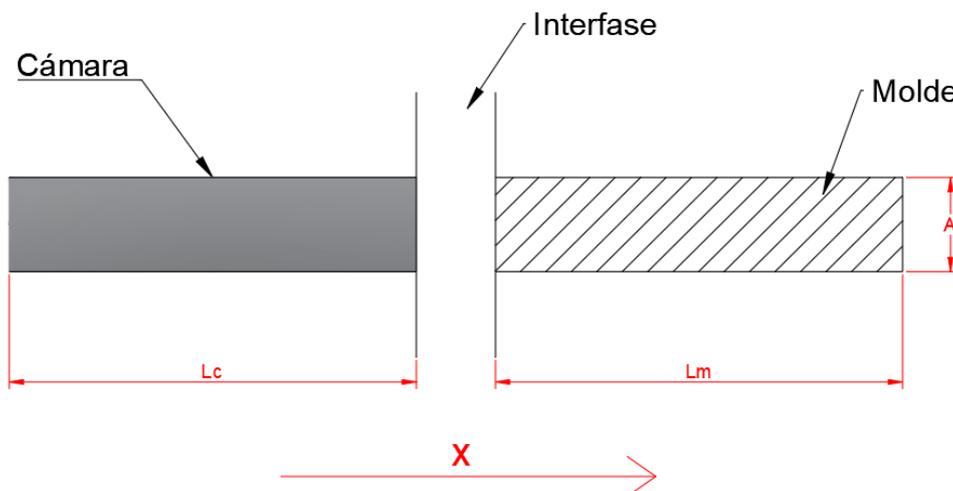


Figura 2.11 Esquema cámara y molde

El flujo de calor en la cámara, la interfase y el molde se define por las siguientes ecuaciones [6]:

Flujo de calor en la cámara:

$$dq_c = -L_c A \rho_c C_c dT_c \quad (2.29)$$

Donde q_c es el flujo de calor a través de la cámara, L_c es la mitad del grosor del muro de la cámara, A es un segmento como se muestra en la figura 2.11, ρ_c y C_c son la densidad y la capacidad calorífica de la aleación, y T_c su temperatura. El signo negativo es debido a que el fluido se está enfriando.

Flujo de calor a través de la interfase:

$$dq_i = hA(T_c - T_m)dt \quad (2.30)$$

Donde q_i es el flujo de calor a través de la interfase, h es el coeficiente de transmisión de calor y T_m la temperatura superficial del molde.

Flujo de calor en el molde:

$$dq_m = -L_m A \rho_m C_m dT_m \quad (2.31)$$

Se puede asumir que el flujo de calor es el mismo en todas las secciones, y con ello podemos establecer, a partir de las ecuaciones (2.29) y (2.31):

$$dT_m = -NdT_c \quad (2.32)$$

$$\text{Donde } N = \frac{L_c \rho_c C_c}{L_m \rho_m C_m}$$

Y a partir de las ecuaciones (2.29) y (2.30):

$$-\frac{L_c \rho_c C_c}{h} \frac{dT_c}{T_c - T_m} = dt \quad (2.33)$$

Integrando y resolviendo esta ecuación entre el tiempo 0 y el tiempo de llenado máximo se obtiene el siguiente resultado:

$$t_{f_{max}} = \frac{L_c \rho_c C_c}{h(1 + N)} \ln\left(\frac{T_{c1} - T_{m1}}{T_{c2} - T_{m2}}\right) \quad (2.34)$$

Donde T_{c1} es la temperatura del metal al entrar al molde, T_{m1} es la temperatura superficial del molde justo antes de que entre el metal, T_{c2} es la temperatura del metal

para el tiempo de llenado calculado y T_{m2} es la temperatura del molde en el tiempo t_{fmax} , y puede ser calculado integrando la ecuación (2.32).

Esta es una forma de estimar t_{fmax} , pero no la única. Algunas fuentes como NADCA [13], proponen una formula diferente para el cálculo estimado de la temperatura máxima de llenado.

$$t_{fmax} = K \left(\frac{T_i - T_f + SZ}{T_{fm} - T_m} \right) e_c \quad (2.35)$$

Donde:

- t_{fmax} = tiempo máximo de llenado.
- K = constante relacionada con el metal del molde.
- e_c = espesor de la cámara.
- T_{fm} = Mínima temperatura del metal fluyendo.
- T_i = Temperatura del metal en la puerta.
- T_m = Temperatura superficial del molde justo antes de la llegada del metal.
- S = Porcentaje de sólido al final del llenado.
- Z = Factor de conversión de unidades de sólidos.

Otros autores [1] proponen la siguiente expresión para el aluminio:

$$t_{fmax} = 40 \cdot \text{espesor promedio del molde (mm)} \cdot 10^{-3} \quad (2.36)$$

También se puede aproximar a partir de la relación volumen del molde y su área [17]:

$$t_{fmax} = \frac{\rho H}{h(T_f - T_0)} \left(\frac{V}{A} \right) \quad (2.37)$$

Siendo ρ la densidad del metal, H el calor latente de fusión y T_f y T_0 la temperatura de fusión del metal y la temperatura ambiente respectivamente.

2.3.3 Velocidad de puerta mínima

Velocidades más bajas requieren menos potencia de la máquina, y evitan la erosión del molde en los alrededores de la puerta, por lo que fabricar con una velocidad baja suele ser más económico. Sin embargo, pueden producirse defectos de porosidad en la pieza si no cumplimos con un valor mínimo de velocidad de puerta. Existen estudios llevados a cabo por conocidas asociaciones de fabricantes, como la North American Die Casting Association (NADCA) en los que se han establecido de manera experimental, para muy diferentes condiciones de operación, dicha magnitud. Por ejemplo, para espesores de

3mm, la velocidad de puerta mínima (según NADCA) es de 700 in/s, unos 17 m/s [9]. Otros estudios [19] recomiendan también valores similares, de unos 19.6 m/s.

Si el metal alcanza la puerta antes de que se alcance la velocidad de puerta mínima, el metal puede llegar a solidificarse prematuramente en la cámara o en la entrada al molde. Esto causará un flujo frío del metal y laminaciones. Por lo tanto, la velocidad del metal en la fase rápida ha de ser incrementada con suficiente antelación para evitar este problema. El objetivo es que el metal alcance la velocidad mínima antes de atravesar la puerta de entrada al molde.

Se sabe también por estudios experimentales [5] que la velocidad de puerta requerida en los procesos FIAP puede provocar la atomización del flujo (formación de un *spray*). El flujo de metal se rompe y se convierte en uno de partículas muy finas a velocidades muy elevadas.

Según las recomendaciones de NADCA, la velocidad mínima de puerta para flujo atomizado puede determinarse mediante la ecuación:

$$v_{g_{min}}^{1.71} e_p \rho \geq J \quad (2.38)$$

Donde:

- $v_{g_{min}}$ = velocidad de puerta mínima.
- e_p = espesor de la puerta.
- ρ = densidad del metal.
- J = factor de atomización.

La ecuación (2.38) y los valores experimentales de J se basan en los cálculos realizados por E. A. Herman [5]. El factor J se define a través de la velocidad del metal inyectado a través de la puerta, y la forma de la puerta. En la fabricación FIAP, la porosidad de la pieza puede reducirse incrementando el factor J de manera que el metal pase a través de la puerta de manera atomizada.

En la práctica, suelen utilizarse valores de J por encima de 750 [8], [9], lo cual es conservador, y se recomienda para un buen análisis del proceso de inyección.

En el Anexo 2.2 se muestra una tabla en la que se especifican diferentes velocidades mínimas de puerta v_g para distintos espesores. Si algún valor se aleja del rango recomendado, deberían realizarse los cambios pertinentes para cumplir con las recomendaciones con el fin de poder obtener la máxima calidad de pieza.

En consecuencia, el valor de velocidad de puerta mínima será determinado a partir de las sugerencias dadas por NADCA, o mediante la fórmula experimental mostrada en la

ecuación (2.38). También será posible trabajar con el valor obtenido en los estudios realizados por Hao et al. (1998).

2.3.4 Velocidad de puerta máxima

La velocidad de puerta máxima también se puede obtener de forma experimental, y está recogida dentro de las recomendaciones dadas por NADCA. También se han realizado diferentes estudios [19] en el que se establece el valor recomendado para cumplir la atomización del flujo.

Dentro de los factores que afectan a este valor, podemos destacar el material empleado y el espesor de la puerta. Cada material, en las condiciones de inyección, tiene una densidad característica, que afectará al flujo del metal de manera distinta para cada caso. Por otro lado, el espesor de la puerta, será otro factor crítico en el análisis de la atomización del flujo y, por tanto, de la velocidad de puerta máxima. El espesor de puerta es directamente proporcional a la porosidad de la pieza fabricada. Éste se define como la distancia entre dos superficies paralelas, en este caso, la distancia entre las dos paredes de la puerta de entrada al molde [8].

Por ejemplo, el valor máximo para una aleación de Aluminio es de 1600 in/s, unos 41 m/s [9]. También es posible encontrar valores estimados de entorno a los 65 m/s [19].

2.4 Análisis del método

La ventana operacional sugiere un rango de valores entre los cuales se obtiene una calidad aceptable de las piezas. Dentro de esta ventana, y bajo la LFM, se encontrará un punto óptimo de fabricación de la pieza. No es posible encontrar este punto de manera analítica sin un trabajo posterior en taller debido a la naturaleza del método que se está siguiendo, por lo que el objetivo previo a la experimentación será el de obtener la mayor área posible bajo la LFM dentro de la VO, para poder, en el taller, variar esos parámetros de manera experimental hasta encontrar el punto óptimo buscado.

A esta capacidad de variación de los parámetros de forma experimental se le conoce como flexibilidad [6]. Los parámetros que definen la flexibilidad pueden ser parámetros de sencilla modificación y de difícil modificación:

- Variables de sencilla modificación: Se trata de variables que pueden ser cambiadas por medio de un actuador o de un sistema de control, como por ejemplo el nivel de potencia, la presión del metal, la temperatura de fusión, etc.
- Variables de difícil modificación: Son variables que requieren modificaciones en el molde o en la máquina, como el diámetro del cilindro, el área de puerta, los vientos, etc.

Se define entonces la flexibilidad a través de un rango entre el tiempo de llenado y la velocidad de puerta dentro de la ventana operacional, bajo la LFM, en el que se encuentra un punto óptimo que puede ser obtenido variando únicamente las variables de sencilla modificación. Se busca esto ya que la modificación de éstas variables es mucho más sencillo y económico que en el caso de las de difícil modificación.

El objetivo final del proceso de optimización es el de obtener un rango más grande para la experimentación, evitando así cambios en el molde.

2.4.1 Optimización del área de puerta

El área de puerta se representa a través de la pendiente de la línea de molde ya que, como se puede ver en la ecuación (2.11), la presión se relaciona con el caudal en función del único parámetro variable A_g . La pendiente de la LMo decrece con el incremento del área de puerta ya que relaciona la presión y el caudal de manera inversamente proporcional.

La LMo que cruza la esquina inferior derecha de la VO es la correspondiente a la mayor área de puerta, y la que cruza la esquina superior izquierda corresponde a la de menor área.

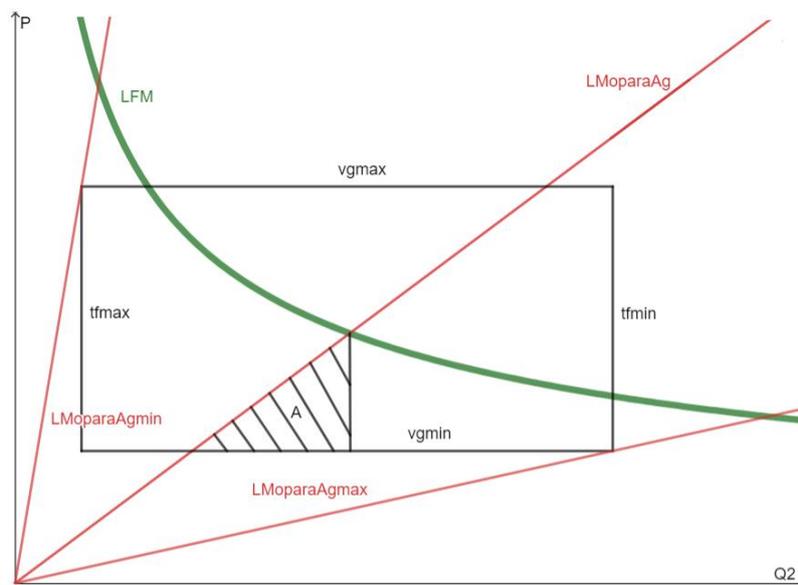


Figura 2.12 Plano PQ^2 con LMo límite y el área A como medida de la flexibilidad

La relación entre el tiempo de llenado y la velocidad de puerta se establece seleccionando un área de puerta específica y representando la LMo.

El área triangular encerrada entre los puntos de intersección de la LMO con la VO y la LFM contiene todas las combinaciones posibles de tiempo de llenado y velocidad de puerta.

La LFM muestra la potencia máxima que puede ser aportada por la máquina durante el proceso de llenado. Como ya se ha comentado, los puntos dentro de la VO que estén por encima de la LFM no son posibles.

El área rayada A que se encuentra bajo la LMO es una representación gráfica de la flexibilidad. Cuanto mayor sea esta, mayor flexibilidad tendrá el proceso y con ello, mayor facilidad en el cambio de los elementos de sencilla modificación.

El objetivo ahora será el de lograr el área A más amplia bajo la curva, consiguiendo así la mayor flexibilidad.

Se definen las pendientes características para el proceso [6], representadas en la figura 2.13:

- K_1 : Pendiente de la recta que une el vértice inferior izquierdo de la VO con el origen.
- K_2 : Pendiente de la recta que une el vértice superior derecho de la VO con el origen.
- K_a : Pendiente de la recta que se forma uniendo el origen con el primer punto de intersección de la LFM con la VO.
- K_b : Pendiente de la recta que se forma uniendo el origen con el segundo punto de intersección de la LFM con la VO.
- K_c : Pendiente para el área de puerta óptima.

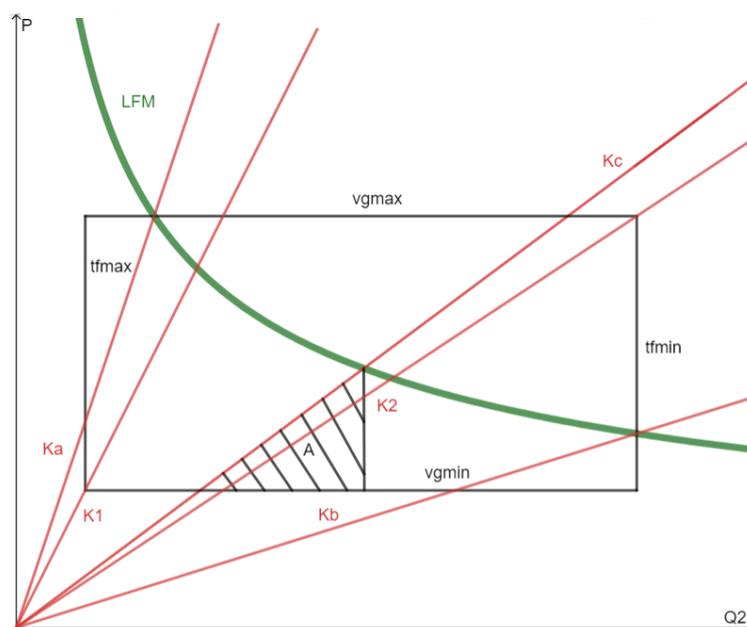


Figura 2.13 Diferentes pendientes de la LMO

Hay ciertas consideraciones respecto a K_c :

1. Cuando la LFM está por encima de la VO, $K_c = K_2$
2. Cuando la LFM cruza la VO
 - a. $K_b \leq K_c \leq K_a$
 - b. $K_c \leq \text{MAX}(K_1, K_2)$

En el caso de que K_c sea menor que K_b , se considera que $K_c = K_b$.

Es posible obtener el valor de la pendiente de K_c a partir de la expresión del área A que encierra en el caso de que $K_b < K_c < K_1$.

Se va a obtener de manera analítica esta área encerrada en la gráfica. Se dibuja el triángulo A como un triángulo rectángulo de vértices $P\left(\frac{P_1}{K_c}, P_1\right)$; $Q\left(\left(\frac{a}{K_c}\right)^{\frac{2}{3}}, P_1\right)$; $R\left(\left(\frac{a}{K_c}\right)^{\frac{2}{3}}, K_c\left(\frac{a}{K_c}\right)^{\frac{2}{3}}\right)$, siendo P_1 la presión correspondiente a la velocidad de puerta mínima.

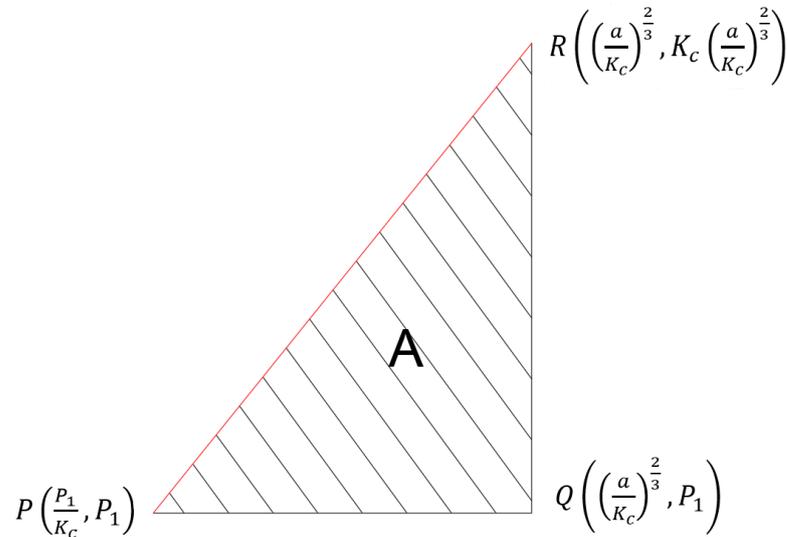


Figura 2.14 Triángulo de área A bajo la LFM

El área de un triángulo definido por dos vectores se calcula como:

$$A = \frac{1}{2} \|\overrightarrow{PQ} \wedge \overrightarrow{PR}\| \quad (2.39)$$

Y operando, es posible llegar a la siguiente expresión:

$$A = \left(K_c \left(\frac{a}{K_c}\right)^{\frac{2}{3}} - P_1\right) \left(\left(\frac{a}{K_c}\right)^{\frac{2}{3}} - \frac{P_1}{K_c}\right) = \frac{1}{2K_c} \left(K_c \left(\frac{a}{K_c}\right)^{\frac{2}{3}} - P_1\right)^2 \quad (2.40)$$

Calculando la derivada con respecto a K_c e igualando a cero, se obtiene el valor máximo como:

$$K_c = \frac{27P_1^3}{a^2} \quad (2.41)$$

La otra solución que se obtiene de K_c es la que define el mínimo valor del área, $A=0$.

Una vez que se ha seleccionado el área de puerta, el diámetro de cilindro se puede elegir para que se cumplan los requerimientos de mínimo tiempo de llenado y máxima velocidad de puerta.

2.4.2 Diámetro mínimo de cilindro

Para el cálculo del diámetro mínimo de cilindro hay que definir en primer lugar el punto operacional. Se trata de un punto de mínimo tiempo de llenado y de máxima velocidad de puerta. Se sitúa en la esquina superior derecha de la VO cuando la LFM está por encima de la VO (y en este caso se habla de un punto de tangencia externo) y en la intersección entre la LMo y la LFM cuando esta última corta la ventana (punto de tangencia interno) [6].

Una línea de máquina que cruce el punto operacional define el diámetro mínimo de cilindro que puede ser utilizado para obtener el tiempo mínimo requerido.

- Cálculo del diámetro de cilindro para punto de tangencia interno:

Es posible obtener el diámetro de cilindro mínimo sustituyendo la ecuación (2.21), siendo P_n el punto de intersección de la LMo con la LFM (punto por donde pasará la LMa), en la ecuación (2.14) y despejando D_c como D_{cmin} .

- Cálculo del diámetro de cilindro para punto de tangencia externo:

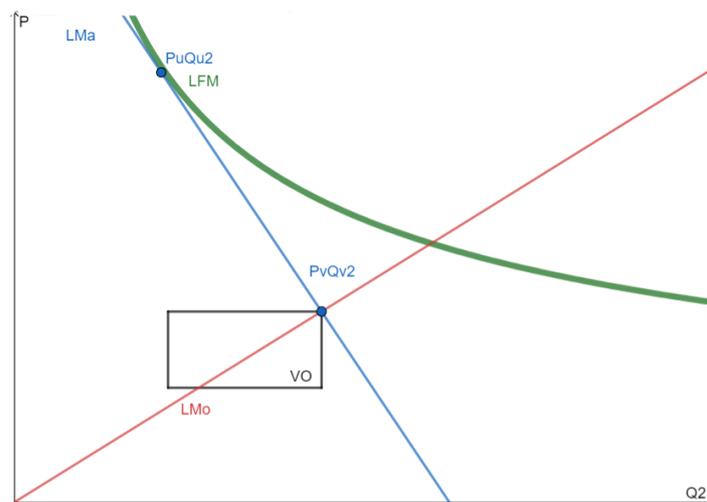


Figura 2.15 Representación punto de tangencia externo en el plano PQ^2

En este caso la LMa cruzará tanto por el punto operacional (P_v, Q_v^2) , y el punto tangente a LFM (P_u, Q_u^2) . En el punto de tangencia, su pendiente será la misma que la de la LFM, y, por lo tanto:

$$\left. \frac{dP}{dQ^2} \right|_{Q_u^2} = -\frac{a}{2(Q_u^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{P_u - P_v}{Q_u^2 - Q_v^2} \quad (2.42)$$

Y la ecuación de la ML es:

$$P = -\frac{a}{2(Q_u^2)^{\frac{3}{2}}}(Q^2 - Q_v^2) + P_v \quad (2.43)$$

Ya que tanto la LFM y la LMa pasan por el punto (P_u, Q_u^2) , se pueden resolver las ecuaciones anteriores para ese punto.

$$P_u = -\frac{a}{2(Q_u^2)^{\frac{3}{2}}}(Q_u^2 - Q_v^2) + P_v \quad (2.44)$$

$$P_u = \frac{a}{Q_u} \quad (2.45)$$

De donde se obtiene:

$$P_u^3 - \frac{3a^2}{Q_v^2}P_u + \frac{2a^2}{Q_v^2}P_u = 0 \quad (2.46)$$

pudiendo resolver:

$$P_u = \frac{2a}{Q_v} \cos\left(\frac{\phi}{3}\right) \quad (2.47)$$

Donde:

$$\cos \phi = -\frac{Q_v P_v}{a} \quad (2.48)$$

Y:

$$Q_u = \frac{a}{P_u} = \frac{Q_v}{2 \cos\left(\frac{\phi}{3}\right)} \quad (2.49)$$

De este resultado se obtiene el punto de intersección de la LMa con el eje de presión (P_0), y D_{cmin} es calculado.

2.4.3 Diámetro máximo de cilindro

En ocasiones, el diámetro máximo del que se dispone en el taller será menor que el mínimo obtenido teóricamente. En ese caso, el procedimiento de cálculo no será exactamente el explicado en apartados anteriores, pues hay que tener en cuenta una nueva restricción de diámetro.

Esta restricción, reduce el área A bajo la LFM, y por tanto la flexibilidad. Por esto, debe obtenerse un nuevo punto óptimo. Esto es así ya que el nuevo diámetro traza una LMa que, como se muestra en la figura 2.16, varía la pendiente de la LMo.

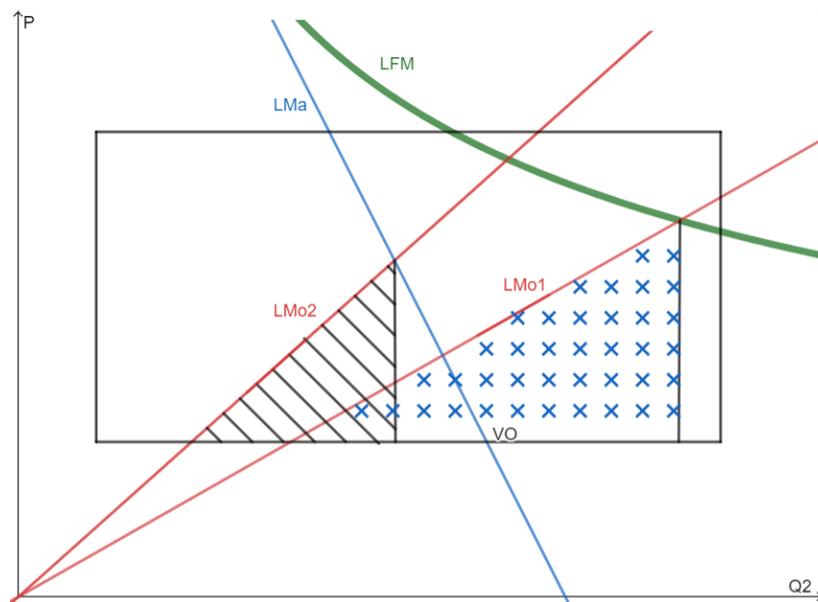


Figura 2.16 Gráfica que muestra la restricción generada por el D_{cmax} . El área rallada es el nuevo valor de A, y el área marcada con cruces la que obteníamos con el método definido en la figura 2.13

El procedimiento es similar al explicado en el apartado 2.4.1, por lo que se obvia su demostración.

Se puede obtener por lo tanto:

$$A = \left(\frac{K_c P_0}{K_c + R} - K_c Q_1^2\right) \left(\frac{P_0}{K_c + R} - Q_1^2\right) \quad (2.50)$$

A continuación, al igual que en el apartado 2.4.1, se realiza la derivada del área respecto a K_c , y se iguala a cero para obtener el valor máximo. En este caso se trata de

una ecuación de tercer grado, por lo que será más complejo de solucionar. El valor de pendiente obtenido para área máxima bajo la LMo2 es el siguiente:

$$K_c = \frac{-P_0 + \sqrt{P_0^2 + 8P_0RQ_1^2}}{2Q_1^2} - R \quad (2.51)$$

Siendo R la pendiente definida por la LMa trazada a partir de la restricción de diámetro de cilindro máximo y Q_1^2 el caudal de llenado mínimo.

2.4.4 Cambio en las restricciones

Es importante resaltar que, aunque en los apartados anteriores se ha considerado la VO como un dato, los valores máximos y mínimos que crean esta ventana pueden variar. Cambios en estas variables van a provocar cambios en la flexibilidad del proceso.

Se ha dicho que el objetivo del estudio es el de obtener un área A bajo la curva con la mayor dimensión posible. Ésta se obtiene en el caso que se muestra en la figura siguiente, en la que la LMo cruza el extremo inferior izquierdo y el extremo superior derecho de la VO.

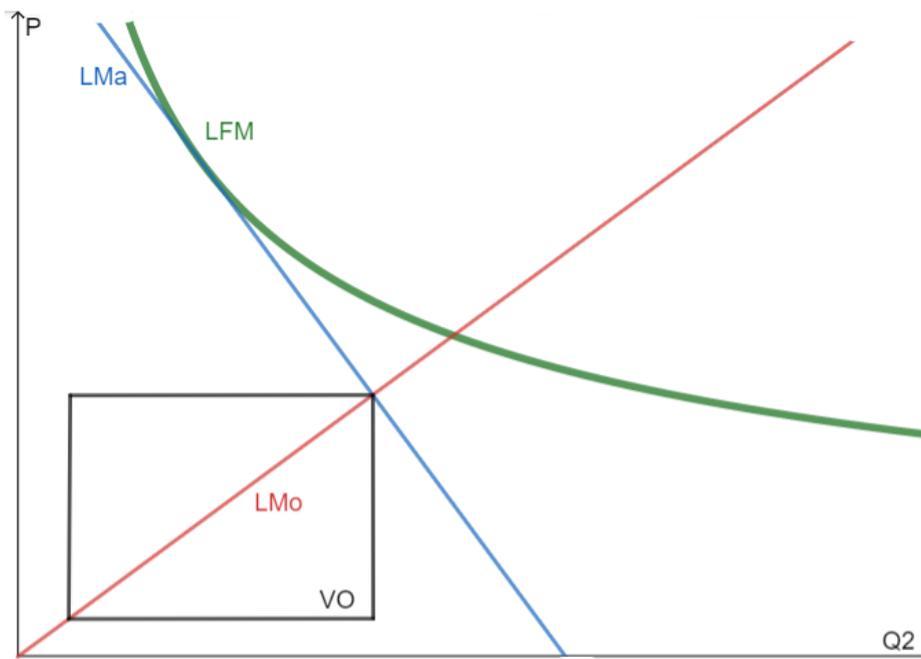


Figura 2.17 Situación óptima representada en el plano PQ^2

Los límites de la VO no dependen del proceso de optimización o del diámetro máximo de cilindro, sino que se obtienen de manera independiente. Por ejemplo, la atomización del flujo que determina la velocidad mínima de puerta depende del espesor de la puerta. A mayor espesor de puerta, menor velocidad mínima.

La peor situación inicial es la representada en la Figura 2.16, donde las dos líneas de molde están separadas y la línea de molde para mayor diámetro de cilindro cruza la ventana operacional.

Para obtener la presión del acumulador óptima, se presenta el concepto de presión crítica del acumulador. A partir de las ecuaciones (2.23) y (2.24) se puede obtener la siguiente expresión:

$$P_{acc}^* = \frac{K_h Q_{max}^2}{A_p^2} \left(\frac{D_p}{D_{cmax}} \right)^4 + P_{max} \left(\frac{D_{cmax}}{D_p} \right)^2 \quad (2.52)$$

Donde K_h es la constante de la válvula obtenida a partir de la presión del acumulador de la máquina y la máxima velocidad del pistón, A_p y D_p son el área y el diámetro del pistón respectivamente, D_{cmax} es el diámetro máximo de cilindro disponible, P_{max} es la presión correspondiente a la máxima velocidad de puerta y Q_{max}^2 es el caudal correspondiente al tiempo mínimo de llenado.

También es posible estimar un nuevo tiempo de llenado mínimo óptimo. Se define el nuevo caudal como:

$$Q_{max} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{a}{P_0} \left(1 - \frac{P_{max}}{P_0} \right)^2 \quad (2.53)$$

Y realizando la conversión de unidades, se obtiene el nuevo tiempo de llenado mínimo:

$$t_{fmin} = \frac{V}{Q_{max}} \quad (2.54)$$

El procedimiento de optimización [6] es el siguiente:

1 – Aumentar la presión del acumulador por encima del valor mínimo y por debajo el máximo permitido.

2 – Aumentar el diámetro máximo de cilindro por encima del valor mínimo.

3 – Aumentar el tiempo mínimo de llenado para que la LMo cruce por su esquina superior derecha.

4 – Cambiar el tiempo máximo de llenado o la mínima velocidad de puerta para obtener una LMo que cruce la esquina inferior izquierda, buscando obtener la representación dada en la figura 2.17. Si esto no es posible:

4.1 – Si $K_1 < K_c$, se recomienda incrementar el tiempo máximo de llenado hasta que $K_1 = K_c$.

4.2 – Si $K_1 > K_c$, se recomienda incrementar la velocidad mínima de puerta hasta que $K_1 = K_c$.

2.5 Ejemplo

Con el fin de explicar el procedimiento teórico desarrollado en los apartados anteriores, se va a realizar un ejemplo sencillo de cálculo.

Se sigue el esquema mostrado en el apartado 2.1. En primer lugar, se han de introducir los datos de trabajo en la base de datos. Esta base de datos, para este ejemplo, es una hoja de cálculo de Excel realizada a partir de las expresiones y métodos explicados a lo largo de este capítulo. Para este apartado, estos datos son suposiciones. En el capítulo 3, se va a ver una aplicación real de este método a la máquina FIAP disponible en el taller del ELDI, en la UPCT.

El primer paso será el de distinguir los datos pertenecientes a la máquina con la que se está trabajando de los datos presentes en el molde. Aunque hay más variables de las que se van a mostrar a continuación (como podría ser la longitud de la cámara de inyección, temperatura del molde, etc.), este trabajo se limita a la determinación de una geometría óptima para la máquina FIAP, por lo que se recopilarán únicamente los datos relevantes.

DATOS DE MÁQUINA		DATOS DE MOLDE	
Diámetro pistón [m]	0.127	Diámetro máximo de cilindro [m]	0.0635
Pacc [Pa]	6895000	Pacc [Pa]	10342135.9
Velocidad máxima de cilindro [m/s]	3.81	Volumen de pieza [m3]	0.00039329

DATOS DEL PROCESO		CONSTANTES	
Tiempo mínimo de llenado [s]	0.02	Cd	0.5
Tiempo máximo de llenado [s]	0.064		
Velocidad de puerta mínima [m/s]	19.4564	Densidad [kg/m3]	2767.99047
Velocidad de puerta máxima [m/s]	60.96		

Tabla 2.1 Características técnicas de la máquina FIAP. Primera iteración

Para conformar la ventana operacional de este ejemplo, será necesario convertir los datos del proceso a unidades de presión y caudal cuadrado, siguiendo el método explicado en el Anexo 2.1.

Con ello, es posible obtener:

Q^2_{\max} [m ⁶ /s ²]	0.000386693
Q^2_{\min} [m ⁶ /s ²]	3.77629E-05
P_{\min} [Pa]	2095653.895
P_{\max} [Pa]	20572378.36

Tabla 2.2 Valores límite de la VO. Primera iteración

El siguiente paso será la determinación de la LFM. Para poder obtenerla es necesario conocer la constante de la válvula (K_h) que regula el flujo de aceite del acumulador. Haciendo uso de la ecuación (2.4) de la manera explicada en el apartado 2.2.3 para la obtención de la velocidad máxima de cilindro:

$$0 = P_{acc} - K_h v_m^2 \rightarrow K_h = 474989.84$$

En esta ecuación se ha utilizado el valor de la presión del acumulador característica de la máquina, que estará determinada en el manual de la misma. Para el resto de cálculos, la presión del acumulador utilizada será la presente en el molde a la hora de la fabricación de la pieza.

Una vez determinada la constante K_h se resuelve la ecuación (2.23) para poder obtener la constante que define la hipérbola de la LFM.

$$a = \frac{2\sqrt{3} \frac{\pi}{4} \cdot 0.127^2 \cdot (10342135.9)^{3/2}}{9 (474989.84)^{0.5}} = 235298.2191 W$$

Siendo posible finalmente definir:

$$LFM \rightarrow P = \frac{235298.2191}{(Q^2)^{0.5}}$$

Con estos valores, y la ecuación (2.41) se obtiene la pendiente que proporcionará el área de puerta óptima.

$$K_c = 27 \cdot \frac{2095653.895^3}{235298.2191^2} = 4488333926$$

Sin embargo, al comparar con $K_b = 30943534232$, se comprueba que $K_c < K_b$ y por lo tanto se debe forzar que $K_c = K_b$.

Con ello finalmente se obtiene que:

$$K_c = 30943534232 \rightarrow A_g = 0.00042 m^2$$

Donde A_g se ha obtenido gracias a la ecuación (2.11) y a la propia definición de K_c como pendiente de la línea de molde para área de puerta óptima.

Para obtener el diámetro de cilindro mínimo es necesario seguir el procedimiento explicado para punto de tangencia interno, ya que la LFM corta la VO. En primer lugar es necesario determinar P_n , punto de corte de la LMO con la LFM.

$$P_n = \frac{a}{(Q^2)^{0.5}} = 11965634.48 \text{ Pa}$$

Con este punto se despeja:

$$\frac{3}{2} 11965634.48 = \left(\frac{0.127}{D_{cmin}}\right)^2 10342135.9 \rightarrow D_{cmin} = 0.096404065 \text{ m}$$

Se trata de un valor muy elevado, al cual no podemos llegar. Como se muestra en la tabla 2.1, se supone un valor de cilindro máximo de 0.0635 m, por lo que será necesario analizar la nueva área de puerta con la limitación impuesta por el diámetro máximo de cilindro. El objetivo final del procedimiento será el de obtener una gráfica similar a la presente en la figura 2.17. Más adelante se modificarán estos valores iniciales introducidos en la BD gracias a las ecuaciones de optimización detalladas en el apartado 2.4 para alcanzar dicho objetivo.

Para conseguir el área de puerta óptima según la limitación de diámetro de cilindro máximo, se ha de resolver la ecuación (2.51). Lo inicial será obtener R, la pendiente de la LMa definida por este diámetro de cilindro:

$$P_0 = 10342135.94 * \left(\frac{0.127}{0.635}\right)^2 = 413685.438 \text{ Pa}$$

$$P = 413685.438 \left(1 - \frac{4}{27} \frac{413685.438^2}{235298.2191^2}\right)$$

$$LMa_{D_{cmax}} \rightarrow P = 413685.438 - 1.89439 * 10^{11} R$$

Gracias a este valor, y considerando $Q_1^2 = Q_{min}^2$ se resuelve la ecuación (2.51):

$$K_c = 1.08441 \cdot 10^{11} \rightarrow A_{gD_{cmax}} = 0.000225944 \text{ m}^2$$

En la Figura 2.18 se muestra una representación gráfica de todos los pasos seguidos a lo largo de este ejemplo, en el plano PQ^2 .

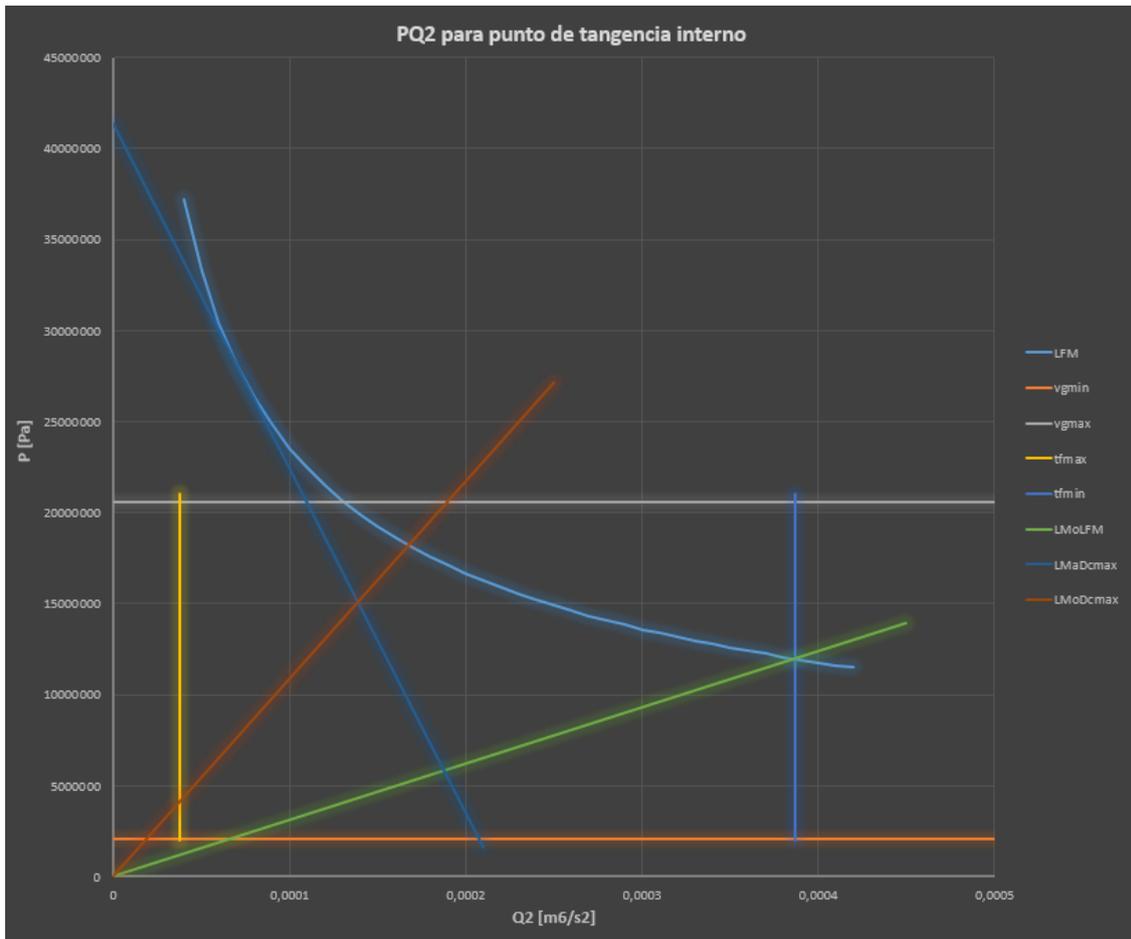


Figura 2.18 Plano PQ². $A_{gLFM} = 0.00042 \text{ m}^2$; $A_{gDcmax} = 0.00023 \text{ m}^2$; $D_{cmin} = 0.0964 \text{ m}$

Con esto, se habría terminado el primer paso del proceso iterativo de cálculo. Ahora, los módulos menores de la capa de variables se encargarán de aproximar los cálculos y proporcionarán algunas modificaciones que podrían mejorar el modelo.

Supongamos ahora, a modo de ejemplo, que el atrapamiento de aire en la pieza supera los valores máximos que estamos dispuestos a admitir. Para mejorar este problema, puede utilizarse una solución como aumentar el tiempo mínimo de llenado, para evitar turbulencias y con ello porosidad. Se asume un valor de tiempo de llenado mínimo de 25 ms. Con esta única variación, se completa ahora la siguiente base de datos:

DATOS DE MÁQUINA		DATOS DE MOLDE	
Diámetro pistón [m]	0.127	Diámetro máximo de cilindro [m]	0.0635
Pacc [Pa]	6895000	Pacc [Pa]	10342135.9
Velocidad máxima de cilindro [m/s]	3.81	Volumen de pieza [m3]	0.00039329

DATOS DEL PROCESO		CONSTANTES	
Tiempo mínimo de llenado [s]	0.025	Cd	0.5
Tiempo máximo de llenado [s]	0.064		
Velocidad de puerta mínima [m/s]	19.4564	Densidad [kg/m3]	2767.99047
Velocidad de puerta máxima [m/s]	60.96		

Tabla 2.3 Características técnicas de la máquina FIAP. Segunda iteración

Q^2_{max} [m ⁶ /s ²]	0.000247483
Q^2_{min} [m ⁶ /s ²]	3.77629E-05
P_{min} [Pa]	2095653.895
P_{max} [Pa]	20572378.36

Tabla 2.4 Valores límite de la VO. Segunda iteración

Se realiza ahora el mismo procedimiento de cálculo que en el caso anterior, obteniendo ahora un nuevo plano PQ².

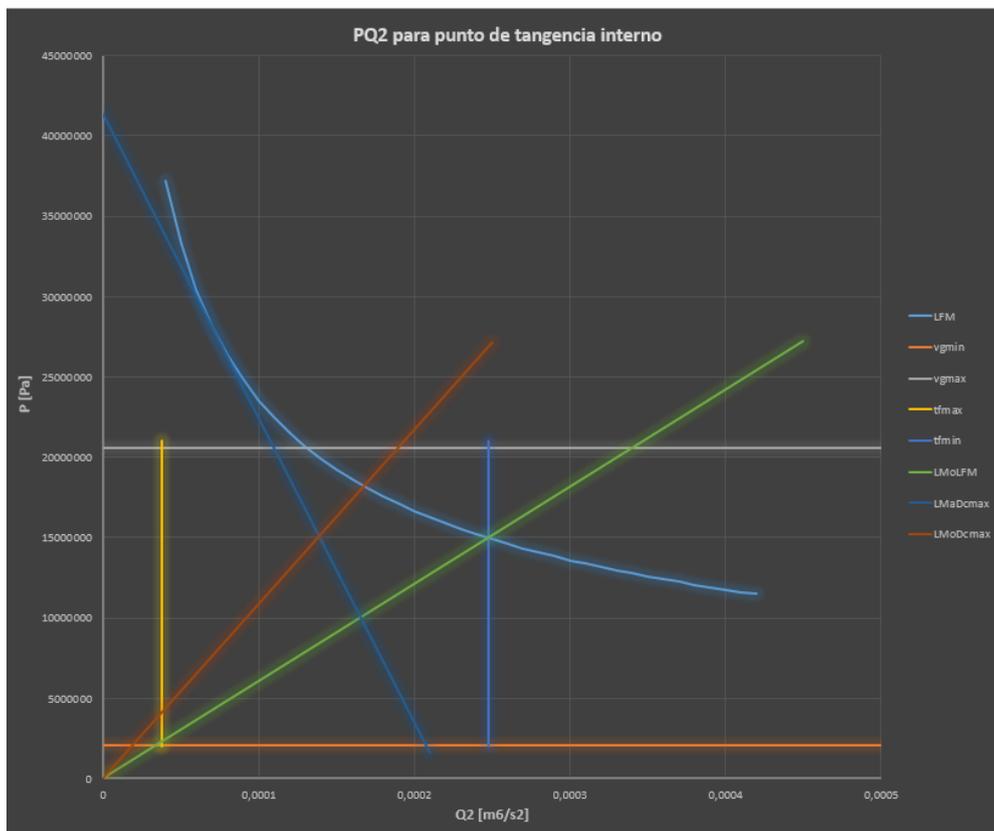


Figura 2.19 Plano PQ². $A_{gLFM} = 0.0003 \text{ m}^2$; $A_{gDcmax} = 0.00023 \text{ m}^2$; $D_{cmin} = 0.0862 \text{ m}$

Se puede apreciar que la Figura 2.19 es similar a la Figura 2.18 con pequeñas variaciones. En este nuevo caso, la recta que marca el caudal cuadrado máximo se ha desplazado hacia la izquierda, elevando de esa manera la pendiente K_c definida por la LFM. Con esto, ambas líneas de molde se han acercado y el área de puerta óptima se ha reducido. También se ha obtenido un nuevo diámetro de cilindro, más cercano a nuestra restricción.

Para el siguiente paso del proceso, se supone una nueva restricción. La presión de acumulador más elevada que puede proporcionar la máquina es de 124,11 bar, por lo que si, durante el proceso de optimización se obtuviese una recomendación de un valor superior, deberíamos forzar al valor más elevado que se pueda alcanzar.

Se hace uso de la ecuación (2.52) para el cálculo de la presión óptima del acumulador, pudiendo despejar:

$$P_{acc}^* = \frac{474989.8 \cdot 0.000247}{\left(\frac{\pi}{4} \cdot 0.127^2\right)^2} \cdot \left(\frac{0.127}{0.0635}\right)^4 + 20572378 \cdot \left(\frac{0.0635}{0.127}\right)^2 = 16840958 \text{ Pa}$$

Como se ha comentado, al obtener un valor de $P_{acc} > 124.11 \text{ bar}$, se establece para este paso un valor límite de 124.11 bar. Se puede entonces completar la siguiente base de datos:

DATOS DE MÁQUINA		DATOS DE MOLDE	
Diámetro pistón [m]	0.127	Diámetro máximo de cilindro [m]	0.0635
Pacc [Pa]	6895000	Pacc [Pa]	12411000
Velocidad máxima de cilindro [m/s]	3.81	Volumen de pieza [m3]	0.00039329

DATOS DEL PROCESO		CONSTANTES	
Tiempo mínimo de llenado [s]	0.025	Cd	0.5
Tiempo máximo de llenado [s]	0.064		
Velocidad de puerta mínima [m/s]	19.4564	Densidad [kg/m3]	2767.99047
Velocidad de puerta máxima [m/s]	60.96		

Tabla 2.5 Características técnicas de la máquina FIAP. Tercera iteración

Q_{max}^2 [m ⁶ /s ²]	0.000247483
Q_{min}^2 [m ⁶ /s ²]	3.77629E-05
P_{min} [Pa]	2095653.895
P_{max} [Pa]	20572378.36

Tabla 2.6 Valores límite de la VO. Tercera iteración

Una vez más, siguiendo el mismo procedimiento, se grafica la Figura 2.20.

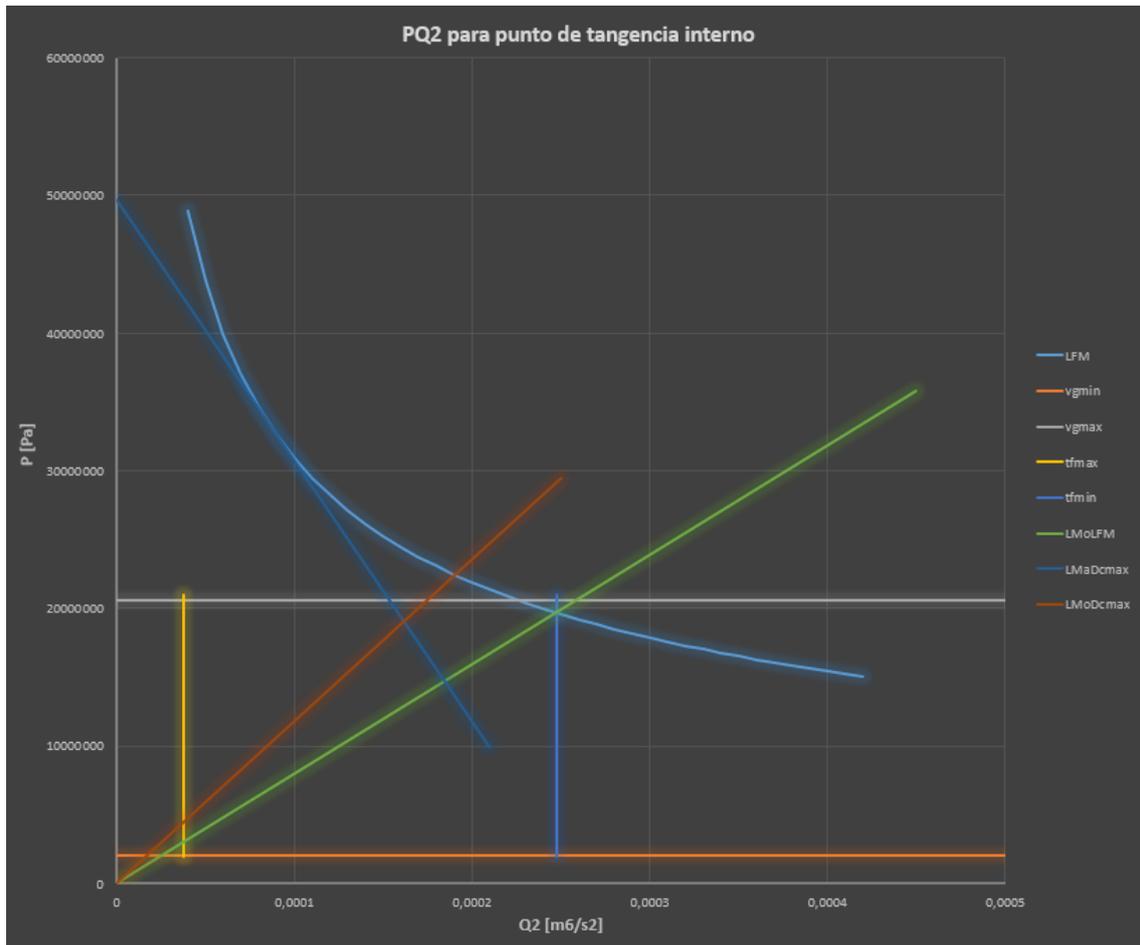


Figura 2.20 Plano PQ². $A_{gLFM} = 0.00026 \text{ m}^2$; $A_{gDcmax} = 0.00022 \text{ m}^2$; $D_{cmin} = 0.0824 \text{ m}$

En este caso, el cambio que ha habido respecto a los anteriores es que la LFM se ha elevado en el plano. Ahora corta la VO más cerca de la esquina superior derecha que en la Figura 2.19. Por otro lado, se puede ver que ha cambiado el área de puerta definido por la restricción de diámetro máximo de cilindro, además de la de LFM. Esto es así debido a la variación en la presión del acumulador, que es un parámetro presente en el cálculo de ambos valores. Una vez más, el diámetro de cilindro se ha reducido, acercándose todavía más a la restricción de diámetro máximo de cilindro.

Haciendo uso de las ecuaciones (2.53) y (2.54) se puede obtener un nuevo tiempo mínimo de llenado para el diámetro de cilindro máximo:

$$Q_{max} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{309323}{12411000 \left(\frac{0.127}{0.0635}\right)^2} \left(1 - \frac{20572378}{12411000 \left(\frac{0.127}{0.0635}\right)^2}\right)^{0.5} = 0.0125 \text{ m}^6/\text{s}^2$$

$$t_{fmin} = \frac{0.00039329}{0.0125} = 0.031 \text{ s}$$

Tras el ajuste al máximo de la presión del acumulador, es necesario ajustar el tiempo de llenado mínimo en busca de la máxima flexibilidad. Se realizan nuevamente los cálculos, ahora con una nueva base de datos.

DATOS DE MÁQUINA		DATOS DE MOLDE	
Diámetro pistón [m]	0.127	Diámetro máximo de cilindro [m]	0.0635
Pacc [Pa]	6895000	Pacc [Pa]	12411000
Velocidad máxima de cilindro [m/s]	3.81	Volumen de pieza [m3]	0.00039329

DATOS DEL PROCESO		CONSTANTES	
Tiempo mínimo de llenado [s]	0.031	Cd	0.5
Tiempo máximo de llenado [s]	0.064		
Velocidad de puerta mínima [m/s]	19.4564	Densidad [kg/m3]	2767.99047
Velocidad de puerta máxima [m/s]	60.96		

Tabla 2.7 Características técnicas de la máquina FIAP. Cuarta iteración

Q^2_{\max} [m ⁶ /s ²]	0.000161
Q^2_{\min} [m ⁶ /s ²]	3.77629E-05
P_{\min} [Pa]	2095653.895
P_{\max} [Pa]	20572378.36

Tabla 2.8 Valores límite de la VO. Cuarta iteración

En este caso, el procedimiento es diferente al seguido en los tres anteriores ya que la línea de funcionamiento de máquina no corta la ventana operacional, por lo que se trata de un punto de tangencia externo, y debido a ello, hay variaciones en el proceso mostrado en los casos anteriores.

Como antes, se comienza con la determinación de la LFM:

$$K_h = 474989.84$$

El valor de K_h se mantiene constante pues es característico de cada máquina.

Se obtiene la constante de la hipérbola:

$$a = \frac{2\sqrt{3} \frac{\pi}{4} \cdot 0.127^2 \cdot (12411000)^{3/2}}{9 (474989.84)^{0.5}} = 309323.874 W$$

Siendo posible finalmente definir:

$$LFM \rightarrow P = \frac{309323.874}{(Q^2)^{0.5}}$$

En este caso no existe la pendiente K_b ya que la LFM no corta la VO. Por lo tanto, se tomará $K_c = K_2$.

Con ello finalmente se obtiene que:

$$K_c = 1.27815 \cdot 10^{11} \rightarrow A_g = 0.00021 \text{ m}^2$$

En este caso, puesto que K_c cruza la esquina superior derecha de la VO, se debe forzar la línea de molde definida para el diámetro máximo de cilindro a cruzar también la esquina superior derecha de la VO, igualando sus pendientes. De esta forma, ambas áreas de puerta se igualan.

Lo último que es necesario calcular es el diámetro mínimo de cilindro. Para determinar este parámetro también hay que variar el procedimiento ya que se trata de un punto de tangencia externo. Se resolverá haciendo uso de las ecuaciones detalladas en el apartado 2.4.2.

Se calcula inicialmente el valor de ϕ , necesario para resolver la ecuación de tercer grado.

$$\phi = \arccos\left(-\frac{\sqrt{0.000161} \cdot 20572378.36}{309323.874}\right) = 2.575 \text{ rad}$$

Lo siguiente será obtener el punto (P_u, Q_u^2) , donde la LMa que se va a trazar es tangente a la LFM.

$$P_u = \frac{2 \cdot 309323.874}{\sqrt{0.000161}} \cos\left(\frac{2.575}{3}\right) = 31875761.74 \text{ Pa}$$

$$Q_u^2 = \left(\frac{309323.874}{31875761.74}\right)^2 = 9.41685 \cdot 10^{-5} \text{ m}^6/\text{s}^2$$

Con estos dos puntos, y conociendo el punto que marca la esquina superior derecha de la VO es sencillo trazar la recta que estamos buscando. Dicha recta intersecta con el eje de ordenadas en el punto $P_0 = 47813642.61 \text{ Pa}$.

Conociendo P_0 , y con la ecuación (2.14) se despeja D_{cmin} :

$$47813642.61 = \left(\frac{0.127}{D_{cmin}}\right)^2 12411000 \rightarrow D_{cmin} = 0.0647 \text{ m}$$

Se muestra en la Figura 2.21 se grafica la representación final de esta iteración.

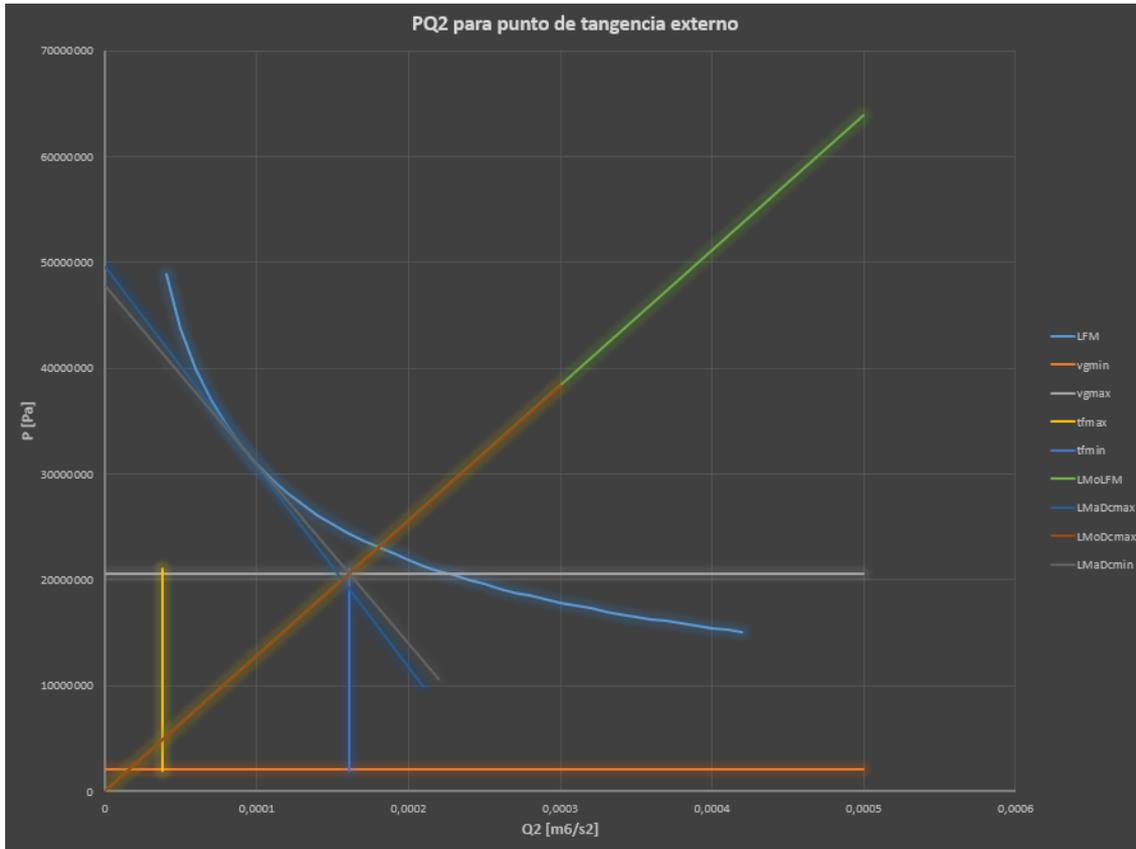


Figura 2.21 Plano PQ^2 . $A_{gLFM} = 0.00021 \text{ m}^2$; $A_{gDcmax} = 0.00021 \text{ m}^2$; $D_{cmin} = 0.0647 \text{ m}$

Tras el proceso iterativo, se puede ver que el objetivo del método está siendo alcanzado. El área dentro de la VO bajo la LFM es cada vez mayor. Además, se ha logrado que ambas líneas de molde sean coincidentes. El último paso para lograr el proceso óptimo es el de ajustar el tiempo de llenado máximo para que las LMo crucen tanto por la esquina superior derecha como por la esquina inferior derecha.

Para cumplir esto, se ha de buscar el punto de intersección de la LMo con la recta de presión mínima (v_{gmin}).

$$2095653.895 = 1.27815 \cdot 10^{11} \cdot Q^2 \rightarrow Q^2 = 1.64 \cdot 10^{-5} \text{ m}^6/\text{s}^2$$

A partir de este valor de caudal, se puede obtener:

$$t_{fmax} = \frac{0.00039329}{\sqrt{1.64 \cdot 10^{-5}}} = 0.09713 \text{ s}$$

Un tiempo de aproximadamente 97 ms.

Con esta variación, el plano PQ^2 queda representado de la siguiente manera:

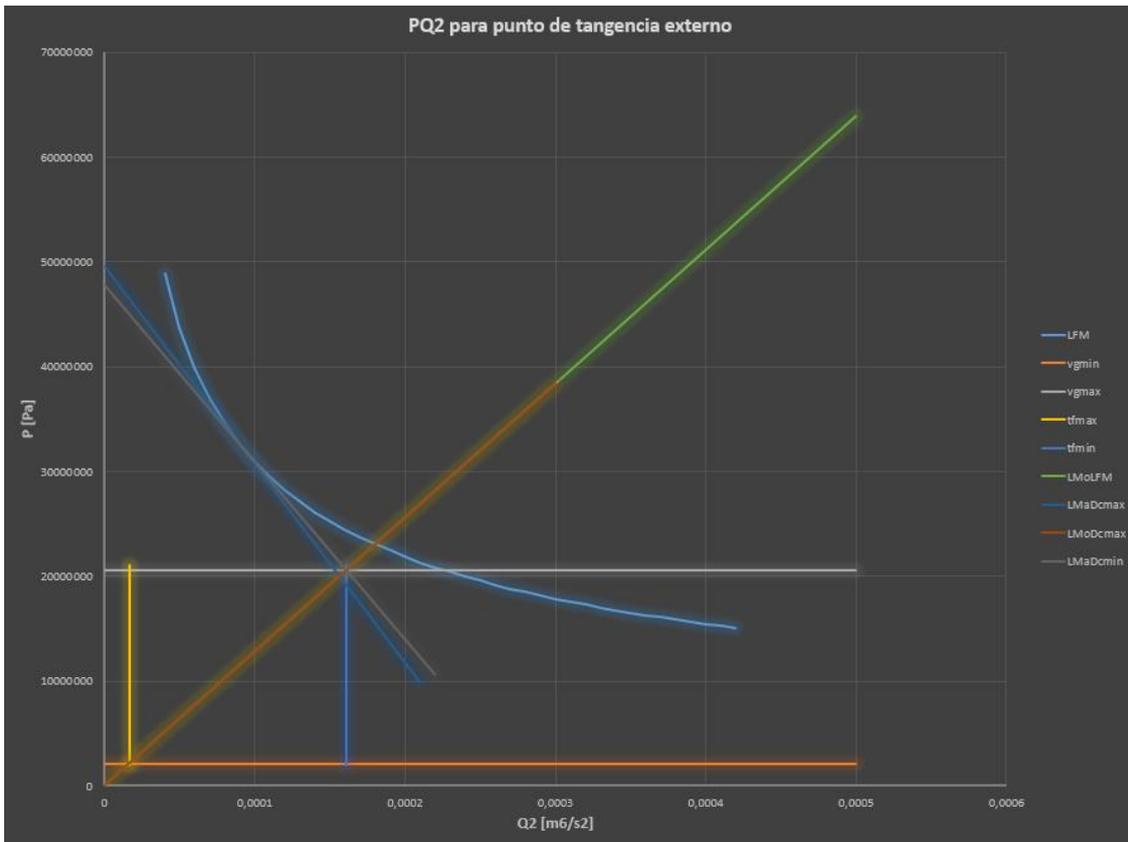


Figura 2.22 Plano PQ^2 final. $A_{gLFM} = 0.00021 \text{ m}^2$; $A_{gDcmax} = 0.00021 \text{ m}^2$; $D_{cmin} = 0.0647 \text{ m}$

El proceso iterativo ha finalizado. Se ha obtenido un diámetro de cilindro aproximadamente igual al que teníamos inicialmente como restricción, por lo que se da por terminado el proceso. En la gráfica se puede ver ahora como la LMo cruza de esquina a esquina la VO, por lo que se ha obtenido un proceso óptimo.

En el siguiente capítulo se desarrollará un procedimiento similar, para una aplicación real.

CAPÍTULO 3: APLICACIÓN A UN ENTORNO PRODUCTIVO

En este capítulo se desarrolla el procedimiento explicado en el capítulo 2, aplicado a la máquina FIAP disponible en el taller de máquinas y herramientas de la UPCT.

Para ello, se han de recopilar en primer lugar los datos reales disponibles. Se va a realizar un procedimiento exhaustivo a la hora de tomar las mediciones y un análisis de las mismas. Tras la definición de los datos, comienza el proceso detallado para poder aplicar el método PQ^2 a este caso en específico.

3.1 Máquina del taller

En este apartado se muestra tanto el taller como la máquina sobre la que se va a realizar la aplicación del método.

3.1.1 Máquina FIAP

La máquina con la que se va a trabajar es de cámara fría horizontal, con un horno situado externamente a ella. Fue adquirida por la Universidad Politécnica de Cartagena en el año 2000, fabricada por la empresa Prensas y Transformaciones S.A. Tiene un tamaño aproximado de 4.9 metros de largo y 1.4 metros de ancho.



Figura 3.1 Vista frontal máquina FIAP



Figura 3.2 Vista lateral máquina FIAP

3.1.2 Bomba de inyección. Acumulador

Se trata de un recipiente en el que se almacena la presión que durante el proceso de inyección será liberada al pistón para el correcto llenado del molde.

La presión que aporta este acumulador es la encargada de desplazar el pistón, y por consiguiente el cilindro, transmitiendo dicha presión al metal fundido, provocando así su movimiento. Cuando la bomba de aceite no puede aportar más presión, se activa una presión adicional, que proviene de un depósito de nitrógeno seco, el cual permite la entrada a la segunda fase del proceso, donde las velocidades son más elevadas.

Por último, se dispone en el equipo de un cilindro multiplicador, que se activa al finalizar la segunda fase del proceso, incrementando aún más la presión proporcionada.



Figura 3.3 Depósitos del sistema de inyección

3.1.3 Horno de fusión

El horno del que se dispone es un horno de crisol calentado por resistencias eléctricas (MORGAN/DUGOPA tipo MARK III) con una potencia total de 42kg. La capacidad de carga es de unos 85kg de aleación de aluminio y presenta unas dimensiones externas de 1180 x 940 x 1250 mm.



Figura 3.4 Horno de fusión y cucharas de colada

En el panel de control se puede apreciar el regulador del horno, el controlador de temperatura de las resistencias que regulan la temperatura del metal, unas led que indican el funcionamiento de estos calentadores, un contador de horas de funcionamiento y la botonera de modos de operación. Existe también un mando de control de la temperatura de las resistencias, que evita un sobrecalentamiento de las mismas.



Figura 3.5 Panel de control del horno

3.1.4 Panel de control

Desde aquí se puede controlar todo el procedimiento de la máquina. Desde la posición del pistón hasta la activación de las alarmas en caso de fallo en el proceso. Es esencial para el control del sistema de inyección, pues se encarga del control de las válvulas.



Figura 3.6 Panel de controles de la máquina

3.1.5 Molde

El sistema de cierre es el encargado de sujetar la pieza durante el llenado del molde, así como de soportar la fuerza ejercida por el metal para completar su solidificación de manera correcta. Se encuentra en esta parte de la máquina con dos elementos esenciales: los platos de sujeción fijo y móvil y el sistema mecánico de cierre, que permite el correcto sellado entre las dos partes.



Figura 3.7 Parte fija y móvil del sistema de sujeción del molde

En este trabajo se ha empleado un molde similar al expuesto en la Figura 3.19 ya que, como puede apreciarse en la Figura 3.9 estamos utilizando un molde que no posee rebosaderos. No obstante, el tamaño de la pieza final será el mismo, una vez eliminado el canal de colada, por lo que a lo que a los cálculos del método PQ^2 respecta la masa de la pieza es la misma que la trabajada por Zamora (2005).



Figura 3.8 Parte móvil (izquierda) y fija (derecha) del molde

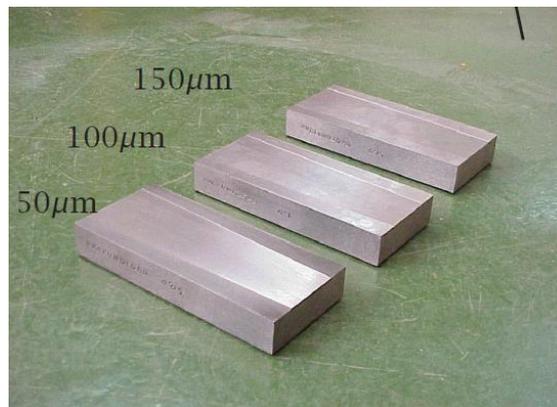


Figura 3.9 Insertos intercambiables para modificar la geometría de los vientos

Aunque el molde tiene muchas más características que las expuestas en este trabajo, como vientos, pernos, canales de colada, etc., éstas no se han explicado ya que no son de relevancia para el método trabajado.

Cabe decir que en el taller de la UPCT se dispone de tres vientos, los cuales serán empleados para el cálculo de los posibles tiempos mínimos de llenado [18], uno de los límites de la ventana operacional. Aunque son de sección divergente, para este trabajo se han estimado como constantes, por lo que puede haber una pequeña variación de milisegundos respecto al tiempo de llenado real.

3.1.6 Sistema de inyección

Es el encargado del movimiento del pistón durante el proceso de inyección del metal hacia la cavidad del molde.

Esta máquina en específico posee una válvula de descarga hidráulica (Parker Hydraulics TDAD-A-1097) que se encarga de controlar la velocidad del pistón durante las tres fases características del proceso según su grado de apertura. Es capaz de alcanzar velocidades de hasta 8 m/s y presiones de hasta 300bar en el molde durante la fase de intensificación de la presión.

Para alcanzar estas velocidades y presiones tan elevadas, el sistema dispone, además del circuito de aceite, de un acumulador de nitrógeno seco que incrementa la presión aplicada al pistón hidráulico y, por otro lado, un cilindro multiplicador que se activa en la tercera fase cuando son requeridas presiones mucho más elevadas.



Figura 3.10 Vista general del sistema de inyección



Figura 3.11 Detalle de la cámara de inyección y entrada al molde

3.2 Toma de datos y medidas

Todas las dimensiones tomadas con el calibre han sido medidas 5 veces para poder realizar un análisis de errores de medida y poder trabajar con la mayor precisión posible.

3.2.1 Diámetro del cilindro y de la cámara de inyección

La primera serie de medidas que se ha tomado en el taller es la de los diferentes diámetros de cilindro disponibles. Son accesibles 3 recambios, más un cilindro que se encuentra actualmente colocado en la máquina de inyección. El objetivo será el de, gracias al método PQ^2 , escoger el diámetro que permita la menor porosidad posible en la pieza.

Se muestra a continuación una serie de figuras donde se pueden apreciar los elementos a los que se tiene acceso, además del instrumento de medida utilizado para determinar el diámetro de los mismos. Lo que se está acotando en cada caso es el diámetro interior de la cámara de inyección, que será el diámetro de cilindro seleccionado. El cuarto cilindro es el que se encuentra actualmente colocado en la máquina FIAP.

Cilindro, émbolo y cámara de inyección son un conjunto intercambiable, pero todos ellos restringidos a un diámetro determinado. En la figura 3.12 se ve a la derecha de la cámara de inyección el cilindro que se acoplará al émbolo para empujar el metal fundido a lo largo de la cámara hasta el molde.



Figura 3.12 Juego completo de cilindro, casquillo y cámara de inyección



Figura 3.13 Juego de cilindro N°1



Figura 3.14 Juego de cilindro N°2



Figura 3.15 Juego de cilindro N°3

Con las cinco medidas tomadas en cada uno de los casos, es posible crear la siguiente tabla:

Diámetro en milímetros	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3	Cilindro 4
Medida 1	69.66	64.57	54.5	49.91
Medida 2	69.64	64.44	54.54	50.2
Medida 3	69.69	64.45	54.68	50.14
Medida 4	69.71	64.64	54.6	50.1
Medida 5	69.71	64.5	54.61	50.12
Media	69.682	64.52	54.586	50.049
Desviación típica	0.03114482	0.08455767	0.06913754	0.10945319

Tabla 3.1 Medidas de los diferentes diámetros de cilindro, en milímetros

La desviación típica es muy pequeña, por lo que se asume que no ha habido errores de cálculo y las pequeñas variaciones son debidas a la precisión del instrumento de medida. Consideraremos por lo tanto los siguientes valores de diámetro para cada cilindro:

$$D_{c1} = 69.7 \text{ mm}$$

$$D_{c2} = 64.5 \text{ mm}$$

$$D_{c3} = 54.6 \text{ mm}$$

$$D_{c4} = 50.1 \text{ mm}$$

3.2.2 Diámetro del pistón

Este valor ha sido proporcionado por la empresa fabricante de la máquina, PRETRANSA.

$$D_p = 100 \text{ mm}$$

3.2.3 Longitud de la cámara de inyección

En este caso se han tomado únicamente 5 medidas para uno de los cilindros indistintamente, ya que la longitud de cámara para los cuatro disponibles es la misma.



Figura 3.16 Longitud de la cámara de inyección

Longitud en milímetros	Cámara
Medida 1	272.81
Medida 2	272.81
Medida 3	272.68
Medida 4	273.62
Medida 5	273.25
Media	273.034
Desviación típica	0.392339139

Tabla 3.2 Medidas de longitud del conjunto de cámara de inyección

Las medidas en este caso son más dispares debido a lo endeble del extensor que porta el calibre. No obstante, los números oscilan todos en torno a un mismo valor:

$$L_c = 273 \text{ mm}$$

3.2.4 Volumen del molde

El volumen del molde se va a obtener a partir del peso del mismo y de la densidad de la aleación empleada en el taller.

Se va a trabajar con una aleación de aluminio llamada EN AC-47100 [AlSi12Cu1(Fe)]. Esta aleación está compuesta por los elementos siguientes en las proporciones especificadas en la figura:

	Si	Fe	Cu	Zn	Mn	Otros
EN AC-47100 (%)	11,0-13,0	1,30	1,00	0,50	0,35	0,25
Análisis (%)	12,35	0,81	0,34	0,26	0,21	0,24

Figura 3.17 Composición porcentual de la aleación de aluminio [14]

La utilización de esta aleación de Aluminio se debe principalmente a su temperatura de fusión inferior en unos 100°C a la del Aluminio puro. Esto reduce la formación de porosidad y supone un ahorro energético al no ser necesario elevar a temperaturas extremas el material empleado. La densidad de esta aleación es de 2.68 g cm⁻³ [14].

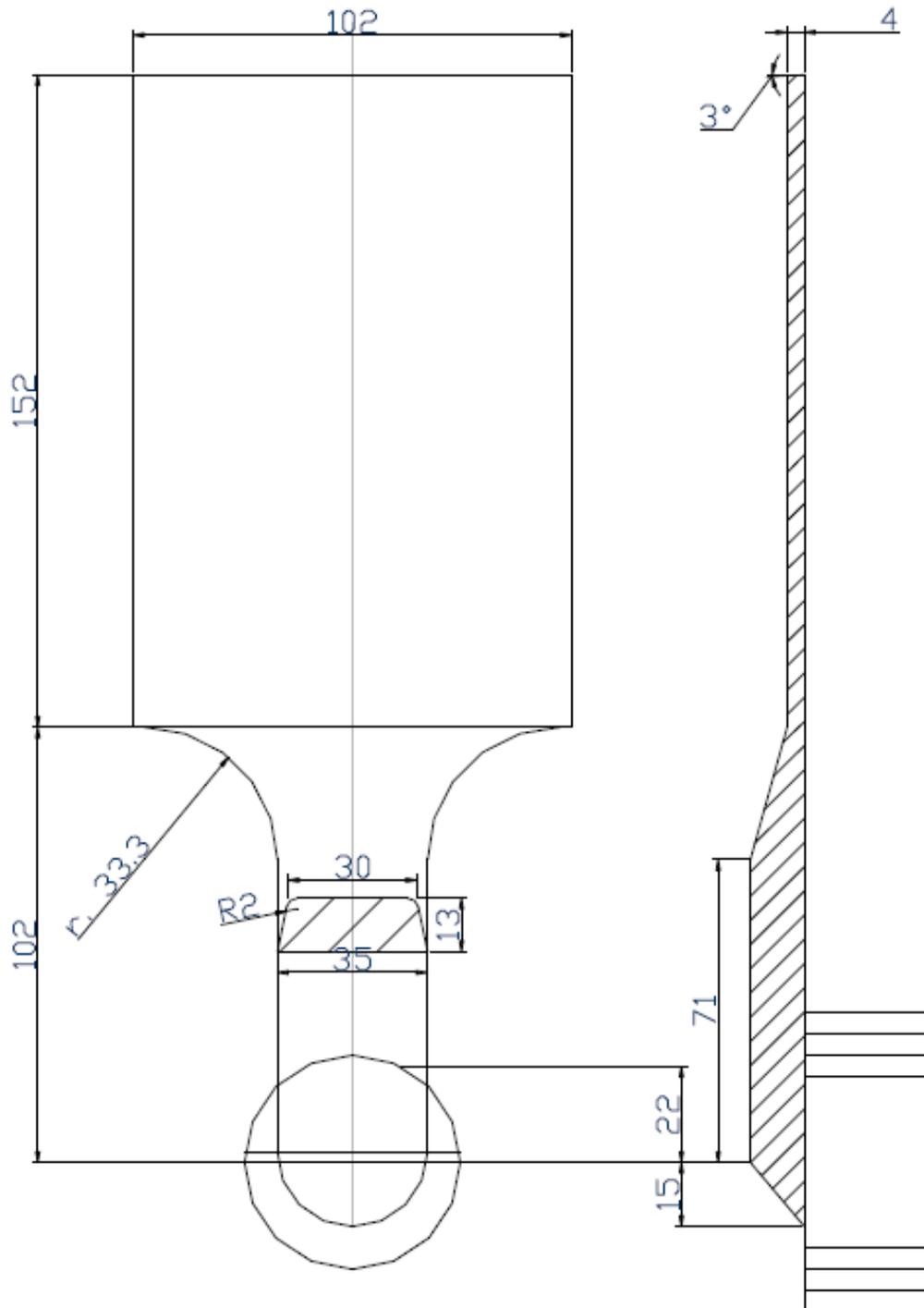
Conocido el material de trabajo y por tanto su densidad, se puede conseguir el volumen del molde, necesario para el procedimiento PQ². En la parte inferior de la Figura 3.18 se pueden ver las características másicas y de superficie de la pieza de trabajo.

El método para obtener el volumen de la pieza es a partir de una ecuación básica. La definición de densidad.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad (3.1)$$

Así se puede obtener finalmente que el volumen de la pieza es de:

$$2.68 = \frac{166}{V_m} \rightarrow V_m = 61.94 \text{ cm}^3 = 6.19 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$



Superficie de la pieza	154.83cm ²
Superficie de rebosaderos	40cm ²
Superficie del canal	57.72cm ²
Superficie de la mazarota	38.46cm ²
Superficie total máxima Diam 70 con rebosaderos	291.01cm ²
Superficie total mínima Diam 40 sin rebosaderos	238.45cm ²
P.e.l. máxima admitida para suprf máx.	515Kg/cm ²
P.e.l. máxima admitida para superf. min.	629Kg/cm ²
Peso de la pieza	166gr
Peso de rebosaderos	107.2gr
Peso del canal	164.4gr
Peso de la mazarota Diam 70	309.2gr
Peso de la inyección completa máximo	728.8gr
Peso de la inyección completa mínimo	520.5gr

Figura 3.18 Pieza empleada en el taller [14]

3.2.5 Presión del acumulador

El acumulador, como ya se ha comentado, es el encargado de accionar el depósito de aceite aplicando una presión a la cara del pistón, empujándolo, para que el metal fundido llene el molde gracias al movimiento del cilindro.

En la siguiente figura se muestra la agrupación de elementos que forman el sistema de inyección de la máquina FIAP.



Figura 3.19 Sistema de inyección disponible en el taller del ELDI



Figura 3.20 Detalle medidores de presión

La presión de funcionamiento de este acumulador es de 75 kg/cm^2 , unos 7355 kPa . Su presión máxima de trabajo se encuentra, según el manual de funcionamiento [21], entre 120 y 130 bar.

3.2.6 Velocidad máxima de cilindro

La máquina FIAP disponible puede alcanzar velocidades de cilindro de hasta 8 m/s cuando la cámara de inyección se encuentra vacía (sin metal fundido en su interior).

3.2.7 Límites de la ventana operacional

Los valores de la velocidad máxima y mínima de puerta los obtenemos de trabajos anteriores [19]. Se puede definir:

$$v_{gmax} = 65 \text{ m/s}$$

$$v_{gmin} = 19.6 \text{ m/s}$$

Por otro lado, los valores del tiempo mínimo de llenado dependen de los 3 vientos de los que se dispone. El tiempo máximo, por otro lado, puede variarse. No obstante se establece un valor inicial de tiempo máximo de llenado según las ecuaciones vistas en el capítulo 2 de valor:

$$t_{fmax} = 0.16 \text{ s}$$

Los tres valores de tiempo mínimo de llenado son dependientes del diámetro de cilindro que se esté utilizando. Por lo tanto se determinarán según el trabajo de Conesa (2021) a lo largo de la aplicación del método PQ².

3.3 Aplicación del método PQ²

A partir de los datos detallados en el apartado anterior, se va a tratar de optimizar la geometría de la máquina del taller del ELDI. Se hará uso de un programa informático desarrollado para realizar los cálculos de manera simple, directa y eficaz.

En primer lugar, se ha de completar la tabla con los datos de entrada del proceso:

DATOS DE MÁQUINA		DATOS DE MOLDE	
Diámetro pistón [m]	0.1	Diámetro máximo de cilindro [m]	0.0697
Pacc [Pa]	7355000	Pacc [Pa]	9000000
Velocidad máxima [m/s]	8	Volumen de pieza [m ³]	0.0000619

DATOS DEL PROCESO		CONSTANTES	
Tiempo mínimo de llenado [s]	0.139	Cd	0.5
Tiempo máximo de llenado [s]	1.5		
Velocidad de puerta mínima [m/s]	19.6	Densidad [kg/m ³]	2680
Velocidad de puerta máxima [m/s]	65		

Tabla 3.3 Base de datos inicial del proceso

La presión de acumulador correspondiente al proceso es la presente en “DATOS DE MOLDE”. Se ha tomado esa presión como un valor arbitrario por debajo del máximo disponible ya que el módulo de optimización recomendará más adelante un valor óptimo a utilizar.

Los tiempos de llenado máximos y mínimo para esta máquina en específico se han obtenido del trabajo de Conesa (2021). El tiempo mínimo de llenado con los vientos que se disponen no puede ser inferior a 0.139 segundos ni superior a 0.334 s, por lo que se ha de tener eso en cuenta a la hora de las recomendaciones.

El diámetro de cilindro mínimo necesario para el proceso es de una medida de 8 milímetros en esta primera iteración, por lo tanto no hay problema con la restricción de diámetro de cilindro máximo.

En la Figura 3.21. se puede ver el plano PQ² para estos datos:

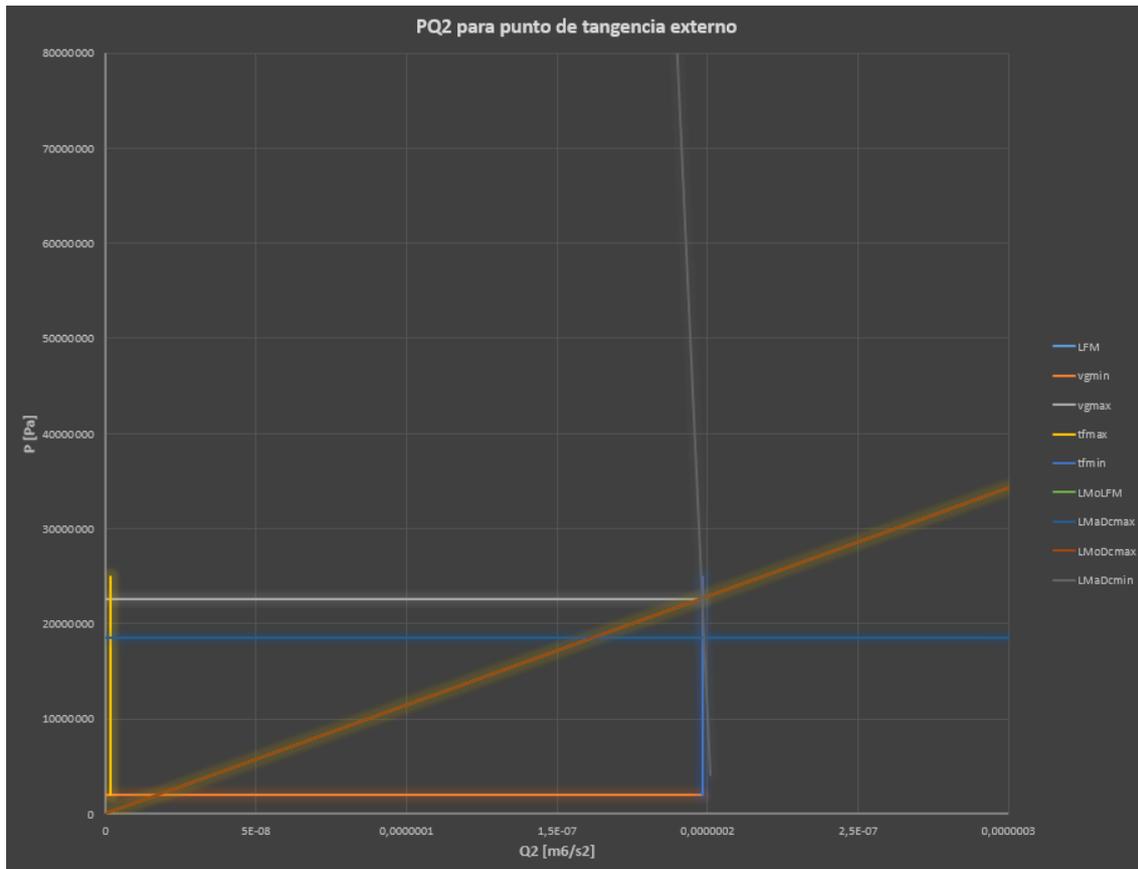


Figura 3.21 Plano PQ² primera iteración. $A_{gLFM} = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $A_{gDcmax} = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $D_{cmin} = 0.008 \text{ m}$

En el plano no es posible ver la línea de funcionamiento de máquina ya que se encuentra muy por encima de la VO, lo que impide apreciar todos los elementos de manera correcta a la vez. Por ello, se ha preferido un detalle de la ventana operacional, ya que es lo que se busca optimizar.

¿Es la presión de acumulador seleccionada la óptima para el proceso? El programa de cálculo recomienda una presión crítica de acumulador de 11 bar. En este caso, al contrario que en el ejemplo mostrado en el capítulo 2, sí que es posible cumplir con dicha recomendación. Se varía dicho parámetro y se comprueba nuevamente el plano PQ².

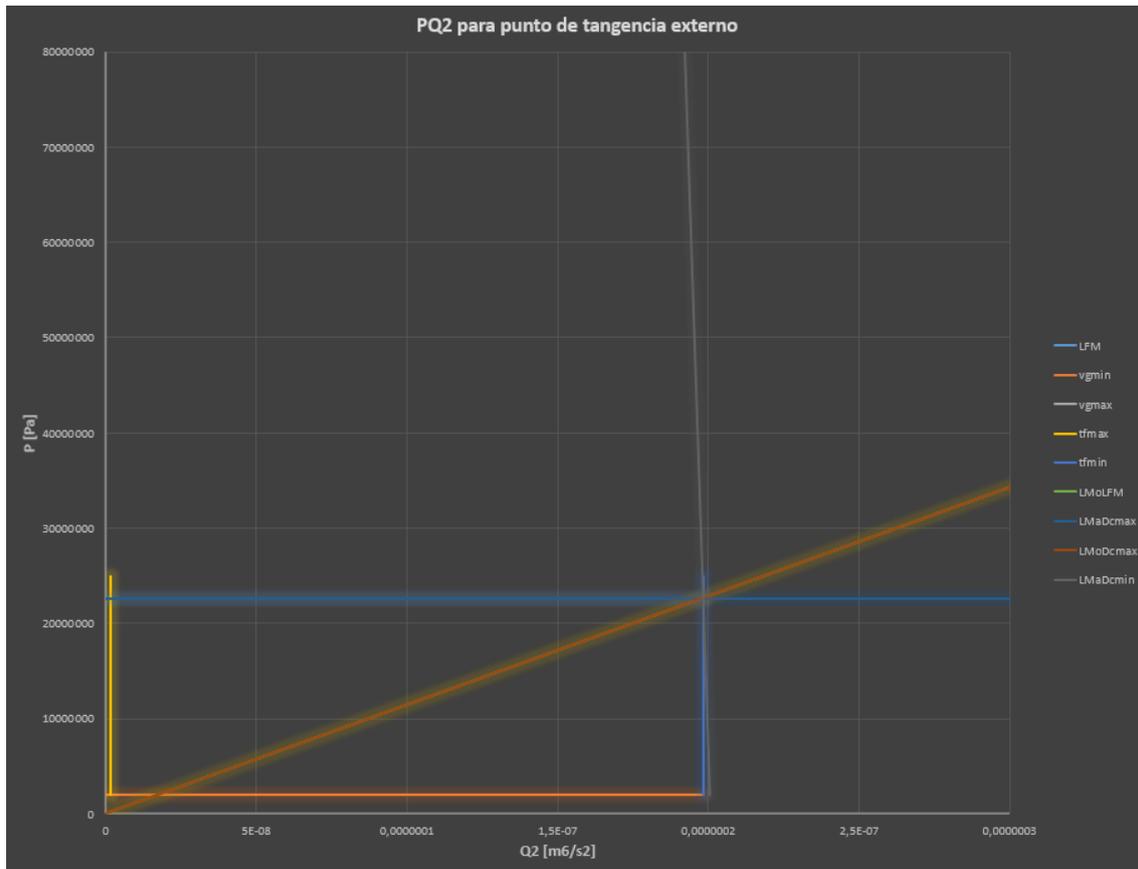


Figura 3.22 Plano PQ² segunda iteración. $A_{gLFM} = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $A_{gDcmax} = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $D_{cmin} = 0.0076 \text{ m}$

Se puede apreciar que en este caso la línea de máquina para diámetro de cilindro máximo ha incrementado su punto de corte con el eje de ordenadas. Esto demuestra que la LFM, aunque no se muestre en el plano, también se ha elevado al aumentar el valor de la presión del acumulador.

El siguiente paso es el de comprobar un tiempo de llenado óptimo para el proceso. El programa de cálculo recomienda un valor de 0.139 s, por lo que ya se posee un valor óptimo de tiempo de llenado mínimo.

El último paso es el de ajustar la ventana operacional para conseguir el mayor Área posible dentro de la VO, bajo la LMo. Se puede apreciar en la Figura 3.22 como una variación del tiempo máximo de llenado podría llegar a proporcionar un área óptima dentro de la ventana, al lograr que la línea de molde cruce ambos vértices de la VO. El valor obtenido para conseguir la máxima flexibilidad es de un tiempo máximo de 0.461s.

Con todos estos cambios, se ha terminado el proceso de cálculo para esta aplicación en particular. Se muestra a continuación la base de datos final, y el plano PQ² obtenido a partir de ellos.

DATOS DE MÁQUINA		DATOS DE MOLDE	
Diámetro pistón [m]	0.1	Diámetro máximo de cilindro [m]	0.0697
Pacc [Pa]	7355000	Pacc [Pa]	11001901.7
Velocidad máxima [m/s]	8	Volumen de pieza [m3]	0.0000619

DATOS DEL PROCESO		CONSTANTES	
Tiempo mínimo de llenado [s]	0.139	Cd	0.5
Tiempo máximo de llenado [s]	0.431		
Velocidad de puerta mínima [m/s]	19.6	Densidad [kg/m3]	2680
Velocidad de puerta máxima [m/s]	65		

Tabla 3.4 Base de datos final del proceso

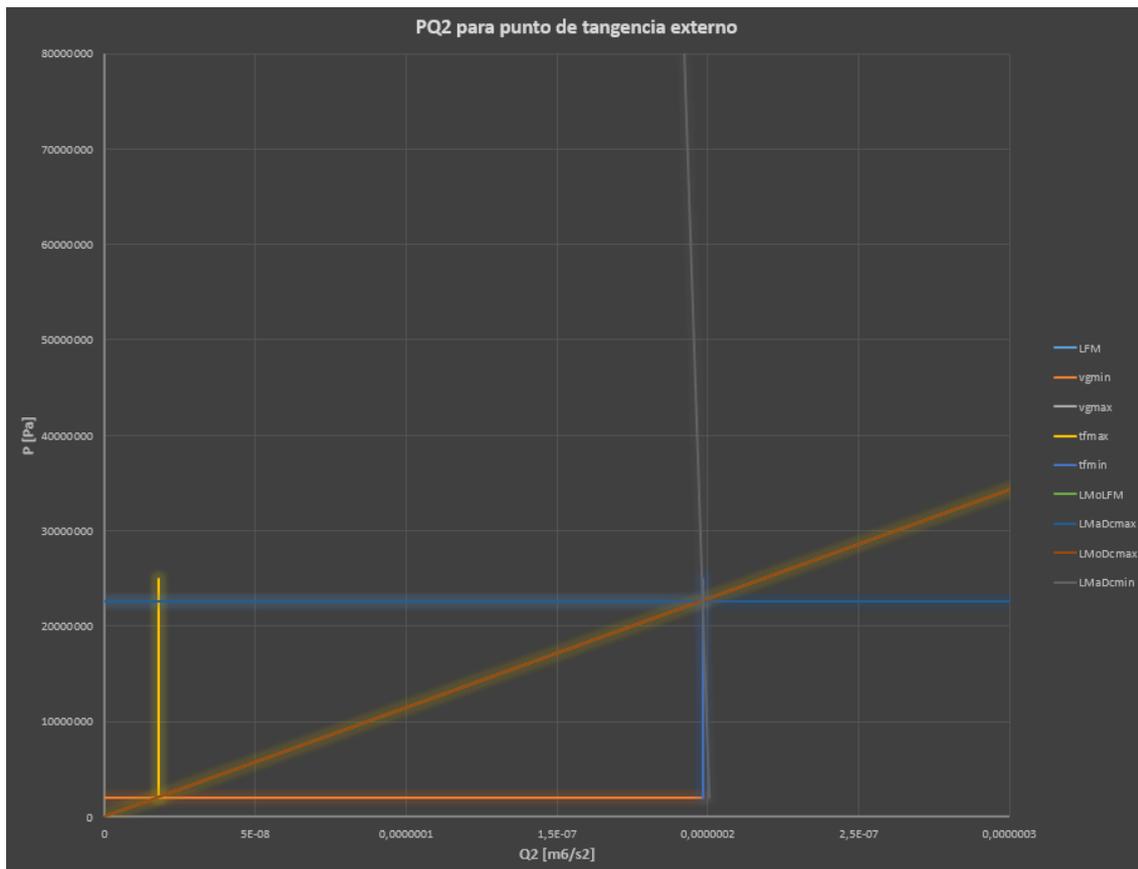


Figura 3.23 Plano PQ² iteración final. $A_{gLFM} = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $A_{gDcmax} = 6.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; $D_{cmin} = 0.0076 \text{ m}$

La línea vertical amarilla, correspondiente al tiempo de llenado máximo, se ha desplazado hacia la derecha cumpliendo así la condición última de optimización.

El trabajo del operario será ahora el de seleccionar un valor de velocidad de puerta y de tiempo de llenado que se encuentre dentro del área del triángulo que se ha logrado con este método. No es posible con los conocimientos actuales conseguir un proceso perfecto

sin trabajo experimental en taller, pero gracias al método PQ^2 puede asegurarse una mayor calidad de pieza mientras se busca dicho punto óptimo, que se encuentra bajo la LMo, dentro de la ventana operacional.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra el programa informático desarrollado en Visual Basic de Excel para el correcto funcionamiento del método. Se mostrarán y explicarán las diferentes ventanas de la aplicación y cómo funciona cada una de ellas de manera superficial. En el Anexo 4.1. se puede ver el código de programación empleado y el funcionamiento del mismo.

A continuación, aprovechando la capacidad que aporta la aplicación se realiza un análisis de parámetros para evaluar cómo afectan los cambios en la variables de entrada en la salida de resultados.

4.1 Desarrollo de aplicación informática

El objetivo que se pretende conseguir con esta aplicación es el de una sencilla utilización del método. De la manera más simple posible se ha resumido el método para que cualquier usuario, sin entender lo que hay tras las ecuaciones, pueda trabajar en cualquier máquina FIAP, ya sea en unidades del sistema internacional como imperiales. El programa está escrito en español e inglés, dependiendo de las unidades empleadas.

El programa es capaz de identificar si se trata de un punto de tangencia externo o interno, si la pendiente de la línea de molde ha de ser aproximada u obtenida mediante ecuaciones analíticas y de sugerir valores óptimos para continuar el proceso iterativo de cálculo. Además, proporciona los valores deseados de las variables de sencilla modificación y el propio gráfico PQ^2 donde se pueden ver las líneas características de la máquina.

Al abrir el archivo se encuentra en primer lugar la siguiente pantalla:

DATA

MACHINE DATA		DIE DATA	
Piston diameter [in]		Max. Plunger diameter [in]	
Pacc [Psi]		Pacc [Psi]	
Max speed [in/s]		Casting vol [in3]	

PROCESS DATA		CONSTANTS	
Min fill time [ms]		Cd	
Max fill time [ms]		g [in/s2]	
Min gate speed [ms]		Density [lb/in3]	
Max gate speed [ms]			

DATOS

DATOS DE MÁQUINA		DATOS DE MOLDE	
Diámetro pistón [m]		Diámetro máximo de cilindro [m]	
Pacc [Pa]		Pacc [Pa]	
Velocidad máxima [m/s]		Volumen de pieza [m3]	

DATOS DEL PROCESO		CONSTANTES	
Tiempo mínimo de llenado [s]		Cd	
Tiempo máximo de llenado [s]			
Velocidad de puerta mínima [m/s]		Densidad [kg/m3]	
Velocidad de puerta máxima [m/s]			

Análisis PQ2

Figura 4.1 Pantalla de inicio

Se distinguen dos grupos diferenciados de toma de datos. “DATA” que refleja los cálculos con unidades del sistema anglosajón de unidades y “DATOS” que será la tabla a rellenar si queremos trabajar con el sistema internacional de unidades.

Estos valores pueden variarse previo a pulsar el botón de “Análisis PQ2” y también tras pulsarlo, durante el transcurso del programa. Es importante introducir los valores en las unidades establecidas entre corchetes para un correcto funcionamiento del programa.

Una vez clicado el botón de “Análisis PQ2” se muestra la ventana del método PQ2 (Figura 4.2.). En ella es posible ver dos botones de opción para la selección de las unidades y también otros tres botones que accionarán los tres procedimientos principales del método: la obtención de los valores más relevantes, una gráfica que muestre el plano PQ2 y por último un botón que proporcione los diferentes valores óptimos que serán de utilidad a la hora del proceso iterativo.

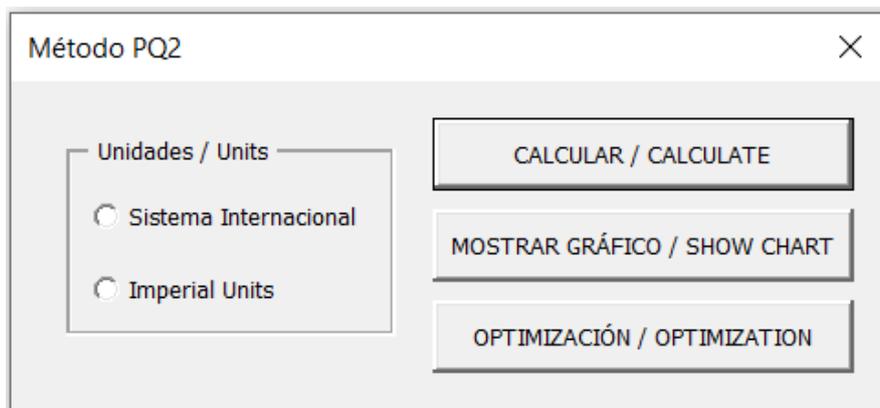
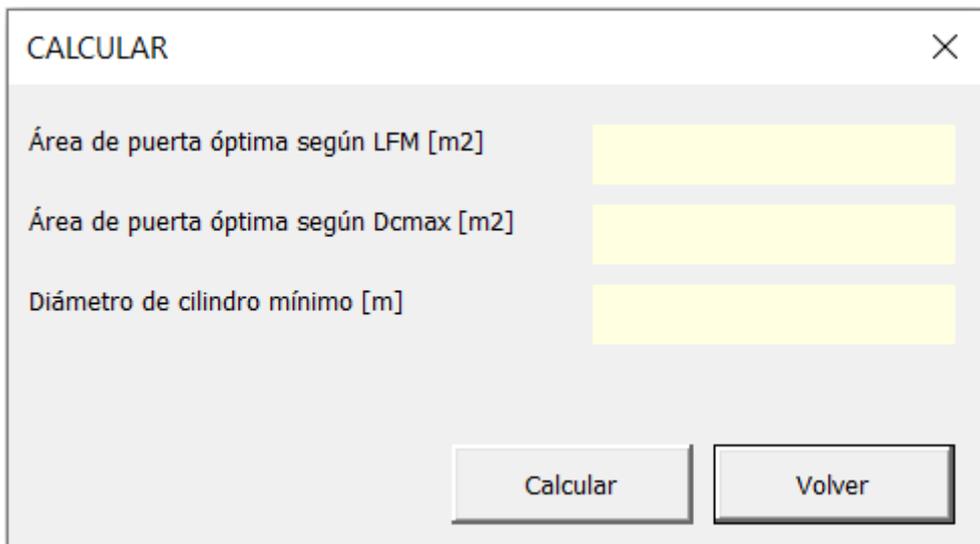


Figura 4.2 Método PQ2

Para el desarrollo de este capítulo, únicamente se explicarán las ventanas correspondientes al sistema internacional de unidades para evitar alargar el mismo. En el botón de opción se debe marcar el sistema de unidades en el que se va a trabajar antes de poder realizar ningún otro cálculo, de lo contrario la aplicación devolverá un error. El proceso será explicado en detalle en el Anexo 4.1.

Una vez seleccionado el sistema internacional de unidades, se puede trabajar con cualquiera de los tres botones principales. El botón de “CALCULAR / CALCULATE” muestra la ventana de la Figura 4.3.



The image shows a software window titled "CALCULAR" with a close button (X) in the top right corner. Inside the window, there are three input fields, each with a yellow highlight behind it, indicating they contain calculated values. The labels for these fields are: "Área de puerta óptima según LFM [m2]", "Área de puerta óptima según Dcmax [m2]", and "Diámetro de cilindro mínimo [m]". At the bottom of the window, there are two buttons: "Calcular" and "Volver".

Figura 4.3 Ventana de cálculos

En ella se muestran dos botones. Al pulsar en el primero de ellos, “Calcular”, se activa el procedimiento de cálculo, mostrando en la zona de color amarillo la solución a los diferentes parámetros de área de puerta óptima y de diámetro de cilindro mínimo. El segundo botón, “Volver”, cierra la ventana de cálculos y vuelve a abrir la ventana principal (Figura 4.2).

El botón de “MOSTRAR GRÁFICO / SHOW CHART” muestra una ventana en la que aparece un gráfico con las líneas características del proceso. En este gráfico el operador podrá determinar si se la línea de funcionamiento de máquina corta la ventana operacional o no, si el área bajo la línea de molde es lo más grande posible (cuando la LMo cruza ambas esquinas de la VO), el valor de los parámetros representados de forma gráfica, etc. También hay un botón en la parte inferior derecha de la ventana, el cual tiene la misma función que el botón “Volver” explicado antes. En la Figura 4.4 se muestra un gráfico de ejemplo con valores arbitrarios para poder ver la ventana en funcionamiento.

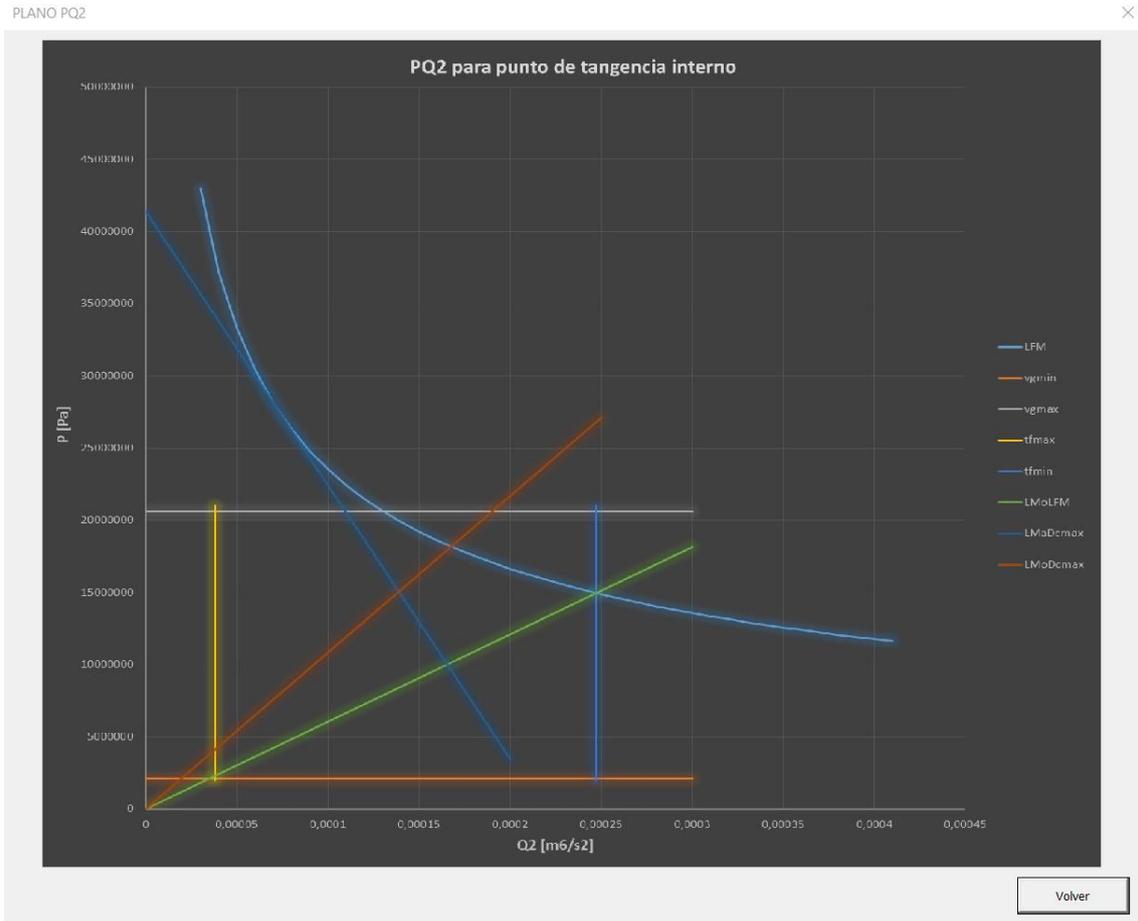
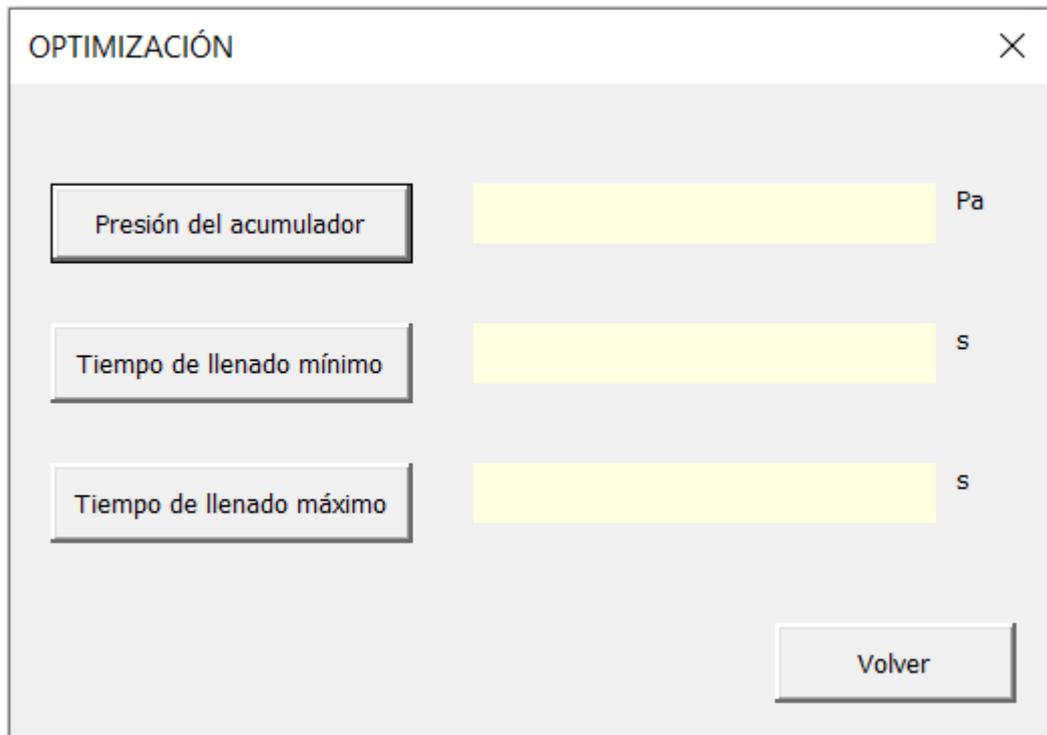


Figura 4.4 Ventana de gráfico

El último botón disponible es el botón “OPTIMIZACIÓN / OPTIMIZATION”. Se obtienen los valores estimados clicando en el botón con su nombre. Los tres parámetros que pueden variarse de manera analítica son la presión del acumulador, el tiempo mínimo de llenado y el tiempo máximo de llenado. Hay que recordar que todas las variables pueden modificarse de manera manual con el fin de obtener un proceso óptimo. Queda en la decisión de cada usuario el buen uso de estas recomendaciones. Por ejemplo, si la presión de acumulador recomendada como óptima es superior a la presión máxima que puede alcanzar una máquina FIAP en concreto, se debe tomar como presión óptima dicho valor máximo.



The image shows a software window titled "OPTIMIZACIÓN" with a close button (X) in the top right corner. Inside the window, there are three rows of input fields. Each row consists of a label box on the left, a yellow input field in the middle, and a unit label on the right. The first row is labeled "Presión del acumulador" with the unit "Pa". The second row is labeled "Tiempo de llenado mínimo" with the unit "s". The third row is labeled "Tiempo de llenado máximo" with the unit "s". At the bottom right of the window, there is a button labeled "Volver".

Figura 4.5 Ventana de optimización

Se ha conseguido, gracias a la programación en Visual Basic, una manera cómoda de trabajar con el método utilizando tres simples ventanas. Todos los cálculos y decisiones intermedias están ocultos en la hoja de cálculo para evitar confusiones del usuario.

4.2 Modificación de parámetros

Es posible dividir los datos de entrada del método en cuatro partes principales: Datos de máquina, Datos de molde, Datos del proceso y Constantes. De estas cuatro, únicamente es posible variar los Datos de molde y del proceso, ya que las otras dos partes contienen datos constantes para cada máquina específica.

A lo largo de este apartado se realizarán hipótesis para los datos de entrada, analizando de este modo como afectan al método. Por otro lado, tanto Datos de máquina como Constantes tomarán valores arbitrarios con el fin de conseguir un correcto visionado del plano PQ².

4.2.1 Datos de molde

- *Diámetro máximo de cilindro.* Como es sabido, el cilindro es un inserto intercambiable que se coloca de manera física en la máquina. Este parámetro está definido por el cilindro más grande disponible en taller.

El primer objetivo del método es el de conseguir un diámetro de cilindro mínimo que sea menor que el máximo disponible en taller. Cuanto mayor sea el diámetro de cilindro máximo, más sencillo será cumplir este propósito. Además, también es importante que el área de puerta óptima según la línea de molde definida por el diámetro de cilindro máximo sea la misma que la definida por la línea de funcionamiento de máquina, como se muestra en la Figura 2.17. donde ambas LMo coinciden.

Por otro lado, los parámetros óptimos también se ven afectados en base a este valor. La presión del acumulador crítica será menor cuanto más grande sea el diámetro de cilindro máximo, ya que no será necesario aplicar una presión muy elevada para cumplir los tiempos de llenado requeridos. El tiempo mínimo de llenado óptimo también varía con el diámetro máximo de cilindro. Cuanto mayor es este diámetro, menor será el tiempo recomendado.

En la figura siguiente se muestran dos planos PQ^2 para un punto de tangencia interno, con la única diferencia de que el situado a la izquierda posee un diámetro de cilindro máximo menor que el de la derecha.

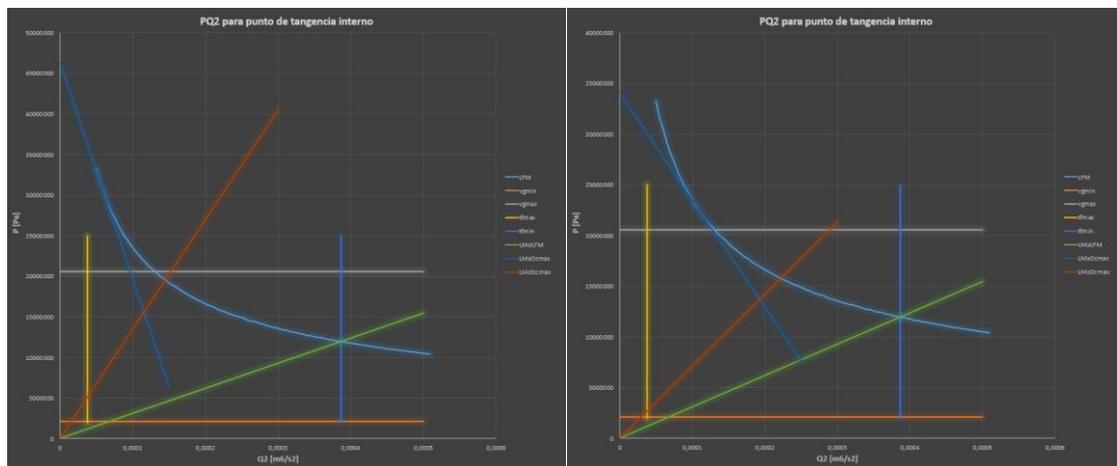


Figura 4.6 Plano PQ^2 . D_{cmax} del plano izquierdo es menor que el del plano derecho

La línea roja en ambas imágenes es la línea de molde correspondiente al diámetro de cilindro máximo. La línea azul oscura es la línea de máquina obtenida a partir de él. Son los únicos dos parámetros variables.

Se puede apreciar como con un incremento del diámetro de cilindro máximo, la recta roja y verde (LMO LFM) se acercan ya que la pendiente de la LMO de D_{cmax} disminuye. Si en algún momento, la línea roja tuviese menos pendiente que la línea verde, éstas se forzarían como coincidentes, cumpliendo de ese modo el objetivo del mismo área de puerta óptima.

- *Presión del acumulador.* Esta presión del acumulador es aquella que es capaz de ser variada. La presión del acumulador presente en Datos de máquina es característica de cada máquina y por tanto no puede ser alterada.

Afecta directamente sobre la línea de funcionamiento de máquina. A mayor presión de acumulador, más elevada se encontrará la LFM en el plano.

La importancia de este parámetro varía dependiendo de si se trata de un punto de tangencia interno o externo.

En el caso de punto de tangencia interno, un aumento de la presión del acumulador disminuye considerablemente el valor del área de puerta óptima según LFM y, en menor medida, según $D_{\text{cmáx}}$. Este aumento también afecta al diámetro de cilindro mínimo, que disminuye conforme aumenta la presión del acumulador.

En el caso de punto de tangencia externo la variación de este parámetro no afecta al valor del área de puerta óptima ya que la pendiente de ambas líneas de molde es K_2 (cruzando el vértice superior derecho de la VO). No obstante, el diámetro de cilindro mínimo varía de forma similar al caso de punto de tangencia interno.

Respecto a los parámetros del módulo de optimización, el único que se ve afectado por una variación en la presión del acumulador es el tiempo mínimo de llenado. A mayor valor de la presión del acumulador, menor tiempo de llenado mínimo óptimo.

- *Volumen de pieza.* Este volumen es el correspondiente a la pieza final que va a fabricarse, sin considerar el volumen de los rebosaderos.

Se trata del parámetro más importante del método en lo que a dependencia de datos se refiere. Una pequeña variación en el volumen de la pieza provoca cambios en áreas de puerta óptimas, diámetro de cilindro mínimo, presión crítica de acumulador y tiempo mínimo de llenado óptimo. También afecta de manera considerable en la representación gráfica del plano PQ^2 ya que este valor es utilizado para la conversión de ejes de los tiempos mínimos de llenado.

Al igual que con la presión del acumulador, dependiendo de si se trata de un punto de tangencia interno o externo variarán tanto el área de puerta óptima y el diámetro de cilindro mínimo, o únicamente el diámetro de cilindro mínimo. Un aumento en el tamaño de la pieza provocará un aumento del área de puerta óptima según LFM y $D_{\text{cmáx}}$ y del diámetro de cilindro mínimo.

Un mayor volumen del molde también afecta directamente en los parámetros del módulo de optimización. Cuanto más grande es la pieza, mayor será el tiempo de llenado mínimo óptimo y la presión de acumulador crítica.

Para ver la sensibilidad de este parámetro, se muestra un pequeño ejemplo a continuación. En la Figura 4.7. se ven dos gráficas, donde todos los parámetros han sido considerados como constantes excepto el volumen de la pieza. En la gráfica izquierda el

volumen de pieza tiene un valor de 400 cm^3 y en la derecha 300 cm^3 . Se puede apreciar como con una variación de volumen de tan solo 100 cm^3 el plano ha pasado de representar un punto de tangencia interno a un punto de tangencia externo ya que la VO ha encogido.

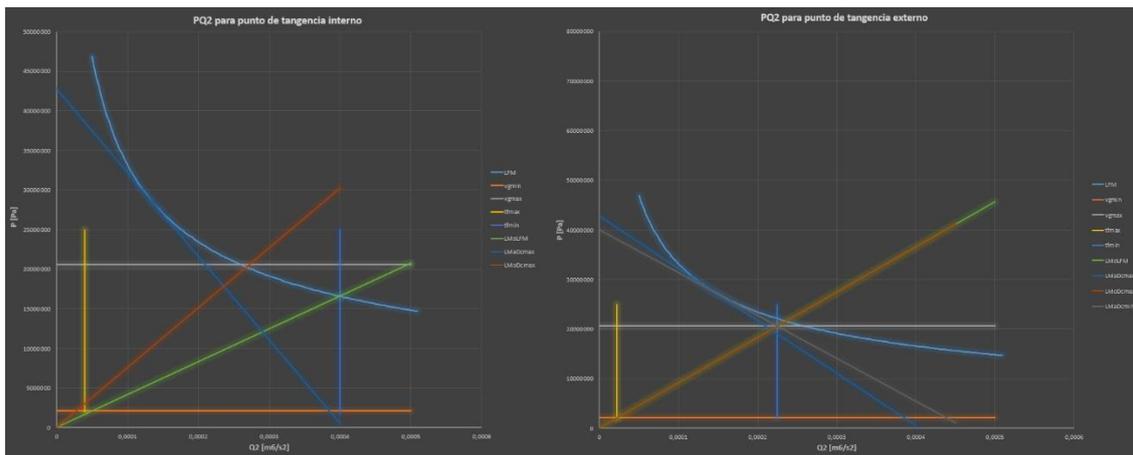


Figura 4.7 Plano PQ^2 . El volumen de la pieza en la gráfica izquierda es mayor que en la gráfica derecha

4.2.2 Datos del proceso

Los datos del proceso son los parámetros que definen los límites de la ventana operacional: tiempo de llenado mínimo y máximo y velocidad de puerta mínima y máxima. Variaciones extremas en estos valores pueden convertir planos PQ^2 de punto de tangencia interno a planos de punto de tangencia externo afectando radicalmente a los valores de salida.

- *Tiempo mínimo de llenado*. Este parámetro afecta directamente, al igual que el resto de los mostrados en este apartado, a los límites de la ventana operacional.

Un aumento de este valor desplazará la línea vertical derecha de la VO hacia la izquierda. Una reducción de este valor, incrementará el tamaño de la VO al desplazar este límite hacia la derecha.

El tiempo mínimo de llenado no afecta directamente al valor de área de puerta óptima según el D_{cmax} cuando se trata de un punto de tangencia interno. En el caso de punto de tangencia externo, un aumento del tiempo mínimo de llenado provoca una disminución del área de puerta óptima según la LFM y del diámetro de cilindro mínimo necesario.

También afecta a los valores recomendados como óptimos. A mayores tiempos, menores presiones del acumulador son necesarias, aunque el tiempo máximo de llenado recomendado como óptimo aumenta. Esto es así porque la pendiente de la línea de molde que se forma con la intersección del tiempo mínimo de llenado y la LFM aumenta (para punto de tangencia interno) como muestra la Figura 4.9.

El tiempo mínimo de llenado recomendado como óptimo no se ve alterado con la variación de este valor.

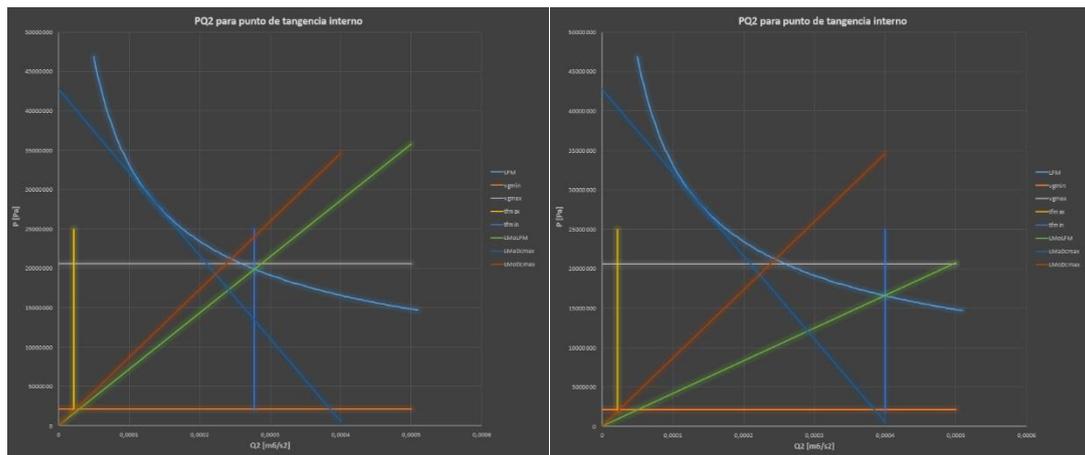


Figura 4.8 Plano PQ^2 . Gráfica izquierda $t_{\min} = 18$ ms. Gráfica derecha $t_{\min} = 15$ ms

Puede verse claramente en la figura cómo se reduce la pendiente de la recta verde (LMO LFM) con la disminución del tiempo de llenado mínimo. El resto de líneas características permanece constante.

- *Tiempo máximo de llenado.* Conformar el lado opuesto al tiempo mínimo de llenado en la ventana operacional. Una reducción de este valor encogerá la ventana operacional.

Su modificación afecta únicamente al área de puerta óptima según D_{\max} . Un incremento del tiempo máximo de llenado provoca una disminución de este valor.

Este parámetro no modifica ninguno de los valores presentes en la ventana de optimización.

- *Velocidad de puerta mínima.* Línea horizontal inferior de la VO. Un aumento de este valor encogerá la ventana operacional, reduciendo así la flexibilidad del proceso.

Modificaciones de este parámetro no afectan en la obtención de los valores de salida de área de puerta óptima y diámetro de cilindro mínimo.

Dentro de la ventana de optimización, únicamente afecta en el cálculo del tiempo de llenado óptimo. Un aumento de la velocidad de puerta mínima provoca una reducción del tiempo de llenado máximo óptimo.

- *Velocidad de puerta máxima.* Línea horizontal superior de la VO. Un aumento de este valor aumentará el área de la VO, aumentando de este modo la flexibilidad del proceso.

Modificaciones de este valor solo son relevantes en el caso de punto de tangencia externo ya que no afectan al cálculo para punto de tangencia interno. En el primer caso, un aumento de la velocidad de puerta máxima significa una reducción del área de puerta óptima y un aumento del diámetro de cilindro mínimo.

Los valores calculados como óptimos sí que se ven afectados con las variaciones en el valor de velocidad de puerta máxima. La presión crítica del acumulador aumenta junto con el valor de v_{gmax} . El tiempo de llenado máximo y mínimo óptimos también crecen con un aumento del valor de la velocidad de puerta máxima.

Con todo lo expuesto anteriormente en este capítulo se puede resumir, según punto de tangencia interno o externo, un cuadro que muestre de manera cualitativa como afectan las variaciones en los datos de entrada a los valores de salida obtenidos.

<i>Datos de salida</i> <i>Datos de entrada</i>	Área de puerta óptima LFM	Área de puerta óptima D_{cmax}	D_{cmin}	Presión crítica de acumulador	t_{fmin} óptimo	t_{fmax} óptimo
Diámetro máximo de cilindro	-	↑	-	↓	↓	-
Presión de acumulador	↓	↓	↓	-	↓	-
Volumen de pieza	↑	↑	↑	↑	↑	-
Tiempo mínimo de llenado	↓	-	↓	↓	-	↑
Tiempo máximo de llenado	-	↓	-	-	-	-
Velocidad de puerta mínima	-	-	-	-	-	↓
Velocidad de puerta máxima	-	-	-	↑	↑	↑

Tabla 4.1 Variaciones de los datos de salida (columnas) frente a incrementos en el valor de los datos de entrada (filas) para punto de tangencia interno

<i>Datos de salida</i> <i>Datos de entrada</i>	Área de puerta óptima LFM	Área de puerta óptima D_{cmax}	D_{cmin}	Presión crítica de acumulador	t_{fmin} óptimo	t_{fmax} óptimo
Diámetro máximo de cilindro	-	-	-	↓	↓	-
Presión de acumulador	-	-	↓	-	↓	-
Volumen de pieza	↑	↑	↑	↑	↑	-
Tiempo mínimo de llenado	↓	↓	↓	↓	-	↑
Tiempo máximo de llenado	-	-	-	-	-	-
Velocidad de puerta mínima	-	-	-	-	-	↓
Velocidad de puerta máxima	↓	↓	↑	↑	↑	↑

Tabla 4.2 Variaciones de los datos de salida (columnas) frente a incrementos en el valor de los datos de entrada (filas) para punto de tangencia externo

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Como se podrá ver, se han alcanzado la mayor parte de los objetivos establecidos. En consecuencia, se exponen los principales resultados obtenidos:

- El método de selección de variables de proceso, conocido como método PQ², ha sido estudiado rigurosamente, y aplicado a procesos de fusión por inyección a alta presión.
- A partir del estudio de las diferentes fases en las que se puede dividir el proceso de inyección en las máquinas FIAP, se ha sistematizado el procedimiento de análisis, tomando como base el método PQ².
- Se han identificado las variables principales de las que se parte en el proceso de selección (P_{acc} , V_m , D_{cmax}) y las variables finales que se pueden optimizar (A_g , D_{cmin}). Así mismo, se han identificado otro conjunto de variables intermedias que permiten realizar la tarea de optimización.
- Para la determinación de la Ventana de Operación (VO) que exige el método PQ², se ha establecido un procedimiento para seleccionar los tiempos de llenado y velocidades en la puerta de entrada, a partir de unas bases de datos y una bibliografía específica.
- El método de selección de tiempo de llenado y velocidad de puerta del presente TFG no proporciona una solución única, sino un rango de valores que, de acuerdo

con el entorno productivo determinado por los datos de entrada, permite encontrar soluciones satisfactorias.

- El procedimiento de selección ha sido adaptado a un entorno industrial determinado. Para ello, ha sido necesario caracterizar todo el sistema de inyección de una máquina FIAP industrial, en los términos que el método PQ^2 exige, y se han realizado los análisis sobre un molde de pieza de aluminio de geometría sencilla. A partir de esta adaptación se han podido comprobar las ventajas y limitaciones del procedimiento.
- Aunque el método es efectivo y sencillo de utilizar, también es complejo. Por ello, se ha explicado en detalle de qué forma se emplean las ecuaciones y líneas características para cada momento determinado.
- Se ha desarrollado una aplicación informática que permite seleccionar, de una forma rápida, simple y sencilla, la geometría de la cámara de inyección. La principal característica es que la aplicación calcula todos los parámetros optimizables, a partir de los valores de entrada introducidos en su base de datos. Además, es capaz de mostrar de manera gráfica el plano PQ^2 , lo que permite obtener, de una manera más intuitiva, una combinación de velocidad de puerta y tiempo de llenado.
- A partir del análisis de resultados, se ha podido comprobar que el tiempo mínimo de llenado y el volumen de pieza son los parámetros de entrada que más afectan en los resultados finales del método. Se ha comprobado los datos de salida son sensibles a pequeñas variaciones de estos valores. Por otro lado, el tiempo máximo de llenado y la velocidad de puerta mínima, son los parámetros que menos afectan al cálculo geométrico de la cámara de inyección. Además, cabe destacar la importancia de la velocidad de puerta máxima en el caso de punto de tangencia externo, ya que un aumento de esta velocidad conllevará un incremento en la pendiente de la línea de molde óptima.
- Se ha podido llegar a determinar que, para que el método tenga la máxima flexibilidad, el plano PQ^2 debe estar formado por una LFM que no cruce la VO, y por una LMo que pase por el vértice superior derecho e inferior izquierdo de la ventana operacional.

Se propone como línea futura de investigación la fabricación física de la pieza de aluminio, haciendo uso de los parámetros obtenidos en este trabajo y de los valores de entrada calculados como óptimos. Con ello, se podrá obtener de manera sencilla la mínima porosidad de la pieza para la optimización calculada según la geometría de la cámara de inyección.

BIBLIOGRAFÍA

[1] López, J. & Faura, F. Fundamentos de Conformación por Fusión de Metales. Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación. Universidad Politécnica de Cartagena, 2004.

[2] Wei, D., Libing, F. & Wei, Z. A Constructed PQ^2 Chart for Calculating the Optimized Process Parameters in Die Casting of Aluminum Alloy. Escuela de la ciencia de los materiales e ingeniería, Universidad de Ciencia y Tecnología de Huazhong, Wuhan. Advanced Materials Research 998-999, 518-521, 2014.

[3] Rajasekar, K. & Priya, G. Design and Development of Pressure Die Casting Parts. International Journal of Engineering Research & Technology. ISSN: 2278-0181, 2015.

[4] Pego Guerra, M.A. Die Casting Design A Parametric Approach. Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial. Instituto de Ottawa-Carleton para la ingeniería mecánica y aeroespacial, 1997.

[5] Herman, E.A. Die Casting Process Control. 2012.

[6] Karni, Y. Selection of process variables for die casting. Universidad estatal de Ohio, 1991.

[7] Genick Bar-Meir. Fundamentals of Die Casting Design. 2012.

[8] North America Die Casting Association. NADCA Product Specification Standards for Die Casting, 2015.

[9] Miller, A. North America Die Casting Association. Gating Manual. Publication #512, 2006.

[10] Nouri-Borujerdi, A. & Goldak, J.A. Modeling of Air Venting in Pressure Die Casting. Journal of Manufacturing Science and engineering. 126, 577-581, 2006.

[11] Andresen, B. Die Casting Engineering. A Hydraulic, Thermal, and Mechanical Process. 2005.

[12] Viedma Robles, A. Movimiento de gases en depósitos y toberas. Movimiento de gases en conductos. Universidad Politécnica de Cartagena. 2012.

[13] Ward, M. NADCA Alucast EC-700 PQ². 2013.

[14] Zamora Pedreño, R. Estudio experimental de la formación de porosidad por atrapamiento de aire durante la etapa lenta de inyección en máquinas de fundición a alta presión. Universidad politécnica de Cartagena. 2005.

[15] Mallick, P.K. In Woodhead Publishing in Materials, Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles (Second Edition), Woodhead Publishing, 2021.

[16] I. Vicario, J. K. Idoiaga, E. Arratibel, I. Erauskin, L. M. Plaza, I. Crespo, P. Caballero, "Development of HPDC Advanced Dies by Casting with Reinforced Tool Steels", International Journal of Manufacturing Engineering, vol. 2015, Article ID 287986, 10 pages, 2015.

[17] López Rodríguez, J. Estudio analítico y numérico de los procesos de fundición por inyección a presión. Universidad politécnica de Cartagena. 2002.

[18] Conesa Ruiz, J. Optimización de la geometría de los vientos en procesos de fundición por inyección a alta presión (FIAP). Aplicación a un entorno productivo. Universidad Politéncnica de Cartagena. 2021.

[19] Hao, S. W., Hu, B.H., Niu, X.P. y Pehlke, R.D., Atomization in High Pressure Die Casting - A Problem and a Challenge", Die Casting Engineer, vol. 42, no. 5, pp. 42-56. 1998.

[20] Hernández Ortega, J.J. Estudio numérico y Experimental de los procesos de fundición a presión. Mecanismos de formación de porosidad durante el llenado del molde. Universidad Politécnica de Cartagena. 2010.

[21] Idra Presse S.p.A. Manuale di istruzioni Pressa OL modello. 2021.

[22] Complete Tooling Solutions, https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/31/2017/08/Uddeholm_Brochure_Complete_Tooling_Solutions_2017.pdf, consultada el 08/07/2021.

[23] Estudio de caso Jet Cooling, <https://lethiguel.org/es/estudio-de-caso-jet-cooling.html>, consultada el 08/07/2021.

[24] Equipment of Die Casting, Two Types of Die Casting Machines, <http://www.metals-china.com/equipment-of-die-casting-two-types-of-die-casting-machines.html>, consultada el 08/07/2021.

[25] SC 3.0 Die Casting Quality Control System | Italtresse Gauss, <https://www.italpressegauss.com/es-es/die-casting-quality-control-system>, consultada el 08/07/2021.

ANEXOS

2.1 Ejemplo de representación gráfica. Conversión de ejes

Supongamos un sistema definido por:

- $V_m = 5.883 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
- $D_p = 0.12 \text{ m}$
- $P_{acc} = 7 \text{ MPa}$
- $C_d = 0.5$
- $v_m = 4 \text{ m/s}$
- $t_{f_{min}} = 18 \text{ ms}$
- $t_{f_{max}} = 60 \text{ ms}$
- $v_{g_{min}} = 20 \text{ m/s}$
- $v_{g_{max}} = 40 \text{ m/s}$
- $\rho = 2740 \text{ kg/m}^3$

Con estos parámetros, se pueden obtener las líneas características del sistema. Para este ejemplo se graficará únicamente la LFM y la VO. Se muestra a continuación el procedimiento seguido para obtener una correcta conversión de los valores tiempo y velocidad.

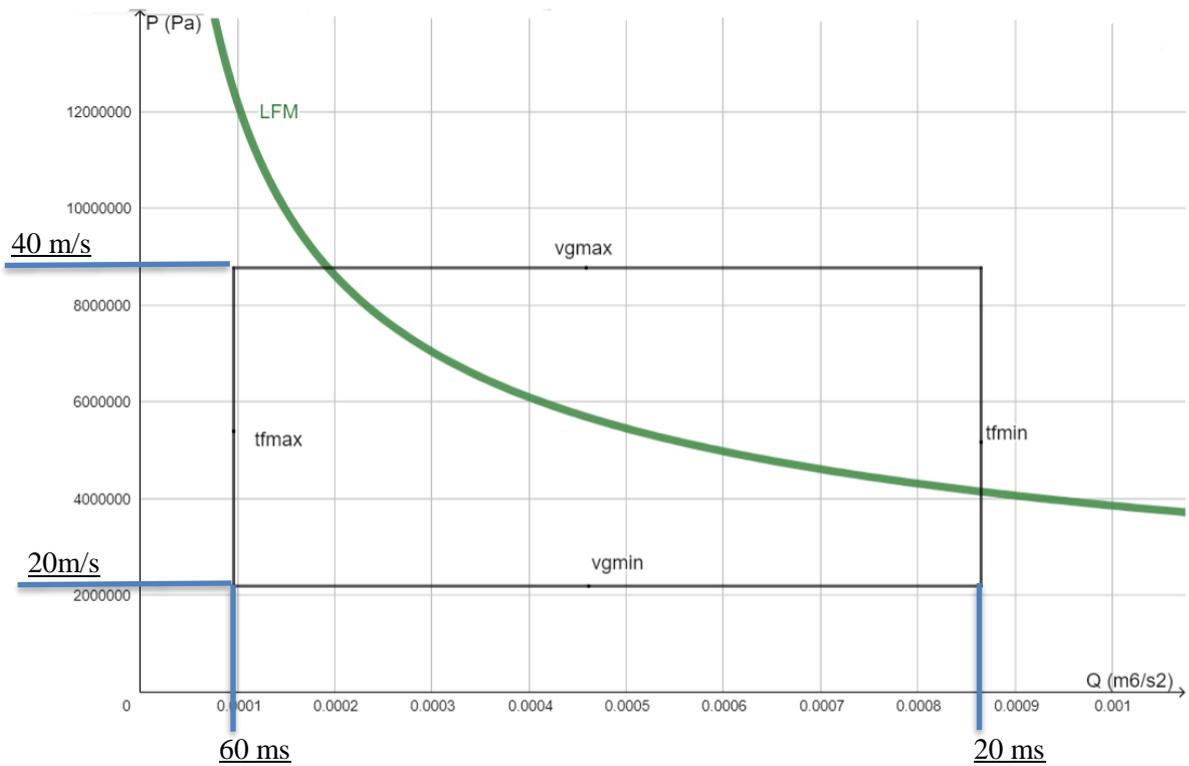
VO:

$$t_{f \min} \rightarrow Q_{\max}^2 = \left(\frac{5.883 \cdot 10^{-4}}{20 \cdot 10^{-3}} \right)^2 = 0.00086524 \text{ m}^6/\text{s}^2$$

$$t_{f \max} \rightarrow Q_{\min}^2 = 0.00009614 \text{ m}^6/\text{s}^2$$

$$v_{g \min} \rightarrow P_{\min} = \frac{2740}{2} \left(\frac{20}{0.5} \right)^2 = 2192000 \text{ Pa}$$

$$v_{g \max} \rightarrow P_{\max} = 8768000 \text{ Pa}$$



2.2 Tabla valores velocidad de puerta mínima $J = 750$

Aluminum				Zinc				Magnesium			
Gate Thickness		Minimum Velocity		Gate Thickness		Minimum Velocity		Gate Thickness		Minimum Velocity	
Inches	mm	in/sec	m/sec	Inches	mm	in/sec	m/sec	Inches	mm	in/sec	m/sec
0.030	0.762	1497	38	0.006	0.152	2312	59	0.012	0.305	3212	82
0.035	1.016	1368	32	0.008	0.203	1954	50	0.015	0.381	2819	72
0.040	1.143	1265	30	0.010	0.254	1715	44	0.020	0.508	2382	60
0.045	1.270	1181	28	0.012	0.305	1542	39	0.024	0.610	2141	54
0.050	1.397	1110	27	0.013	0.330	1471	37	0.028	0.711	1957	50
0.055	1.524	1050	25	0.014	0.356	1409	36	0.032	0.813	1810	46
0.060	1.651	998	24	0.015	0.381	1353	34	0.036	0.914	1689	43
0.065	1.778	952	23	0.016	0.406	1303	33	0.040	1.016	1588	40
0.070	1.905	912	22	0.017	0.432	1258	32	0.044	1.118	1502	38
0.075	2.032	876	21	0.018	0.457	1216	31	0.048	1.219	1428	36
0.080	2.159	843	21	0.019	0.483	1178	30	0.052	1.321	1363	35
0.085	2.286	814	20	0.020	0.508	1144	29	0.056	1.422	1305	33
0.090	2.413	787	19	0.021	0.533	1111	28	0.060	1.524	1253	32
0.095	2.540	763	19	0.022	0.559	1082	27	0.064	1.626	1207	31
0.100	2.794	740	18	0.023	0.584	1054	27	0.068	1.727	1165	30
0.110	3.048	700	17	0.024	0.610	1028	26	0.072	1.829	1126	29
0.120	3.302	665	16	0.026	0.660	981	25	0.076	1.930	1091	28
0.130	3.556	635	15	0.028	0.711	939	24	0.080	2.032	1059	27
0.140	3.810	608	15	0.030	0.762	902	23	0.084	2.134	1029	26
0.150	4.064	584	14	0.032	0.813	869	22	0.088	2.235	1002	25
0.160	4.572	562	13	0.034	0.864	838	21	0.092	2.337	976	25
0.180	5.080	525	13	0.036	0.914	811	21	0.096	2.438	952	24
0.200	5.842	494	12	0.040	1.016	762	19	0.100	2.540	930	24
0.230	6.604	455	11	0.045	1.143	712	18	0.150	3.810	733	19
0.260	7.620	423	10	0.050	1.270	669	17	0.200	5.080	620	16
0.300	8.890	389	9	0.060	1.524	602	15	0.250	6.350	544	14
0.350	10.160	356	8	0.070	1.778	550	14	0.300	7.620	489	12
0.400	11.430	329	8	0.080	2.032	508	13	0.400	10.160	413	10
0.450	11.430	307	8	0.090	2.286	475	12	0.450	11.430	386	10
0.500	12.700	289	7	0.100	2.540	446	11	0.500	12.700	363	9

Se pueden distinguir 2 partes bien diferenciadas. La primera a la izquierda de la hoja de cálculo, donde están las ecuaciones y parámetros calculados a partir de los datos de entrada. La segunda, la representación gráfica de las líneas características del método.

Como ejemplo, comentar que en cálculos auxiliares podemos ver “KcMPE puro” y “Kb”. Nuestro “KcLFM” será uno u otro dependiendo de la pendiente de Kc como se explicó en el Capítulo 2. El mismo razonamiento se sigue para todo el proceso. Siguiendo paso a paso las ecuaciones y condiciones explicadas, puede obtenerse una hoja de cálculo que automatice el proceso variando únicamente los parámetros de entrada.

Por último, comentar la hoja “corte” donde hay cálculos intermedios para la toma de decisiones del programa.

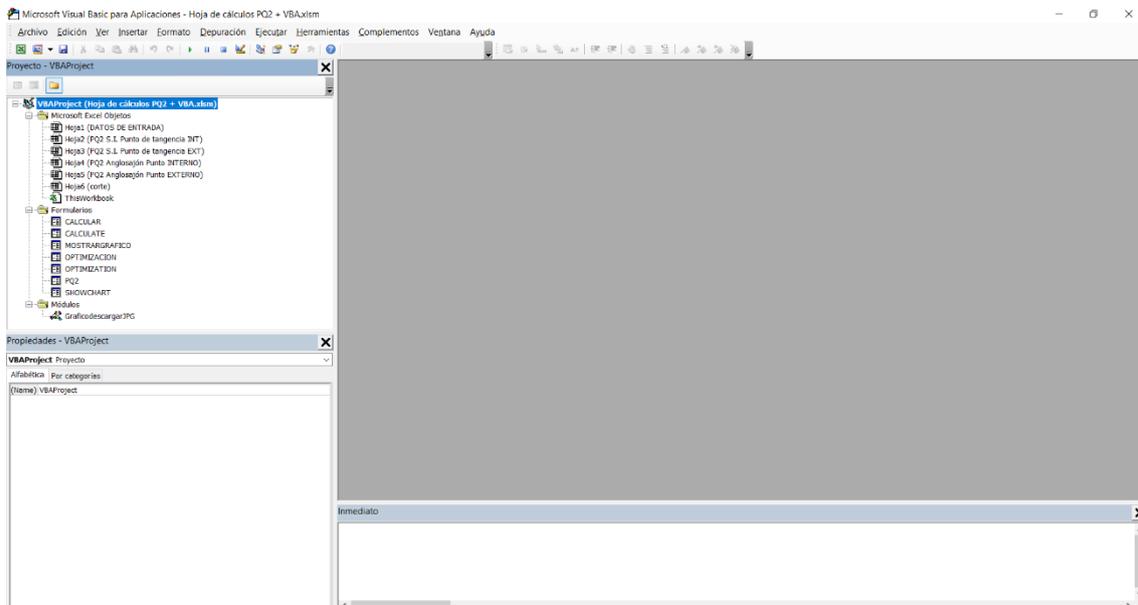
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1					OPTIMIZACIONES						
2	si	=('PQ2 S.I. Punto de tangencia INT!'IC19/'PQ2 S.I. Punto de tangencia INT!'IC16)^2									
3					Pacc* S.I.	=('PQ2 S.I. Punto de tangencia	tfin S.I.	=('DATOS DE	tmax S.I.	=('DATOS DE EN	
4	imperial	=('PQ2 Anglosajón Punto INTERNO!'IC19/'PQ2 Anglosajón Punto INTERNO!'IC16)^2									
5					Pacc* Imperi	=('PQ2 Anglosajón Punto IN	tfin Imperi	=('DATOS DE	tmax Imperi	=('DATOS DE EN	

La primera columna nos muestra la ecuación $\left(\frac{a}{P_{max}}\right)^2$, que será más adelante comparada con el caudal máximo para comprobar si la MPE cruza o no la ventana.

En la sección de optimizaciones se muestran los cálculos para las ecuaciones (2.52) y (2.54). El tiempo de llenado máximo no es más que el punto de intersección entre Kc y la presión mínima correspondiente a la mínima velocidad de puerta.

PROYECTO VBA

Aquellas pestañas cuyo código no quede comentado en este apartado es porque no contienen líneas de código. Se muestra únicamente la información relevante.



Hoja1 (DATOS DE ENTRADA)

Option Explicit

Private Sub CommandButton1_Click()

PQ2.Show False

End Sub

ThisWorkbook

Option Explicit

Private Sub Workbook_Open()

Sheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia INT").Visible = False

Sheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia EXT").Visible = False

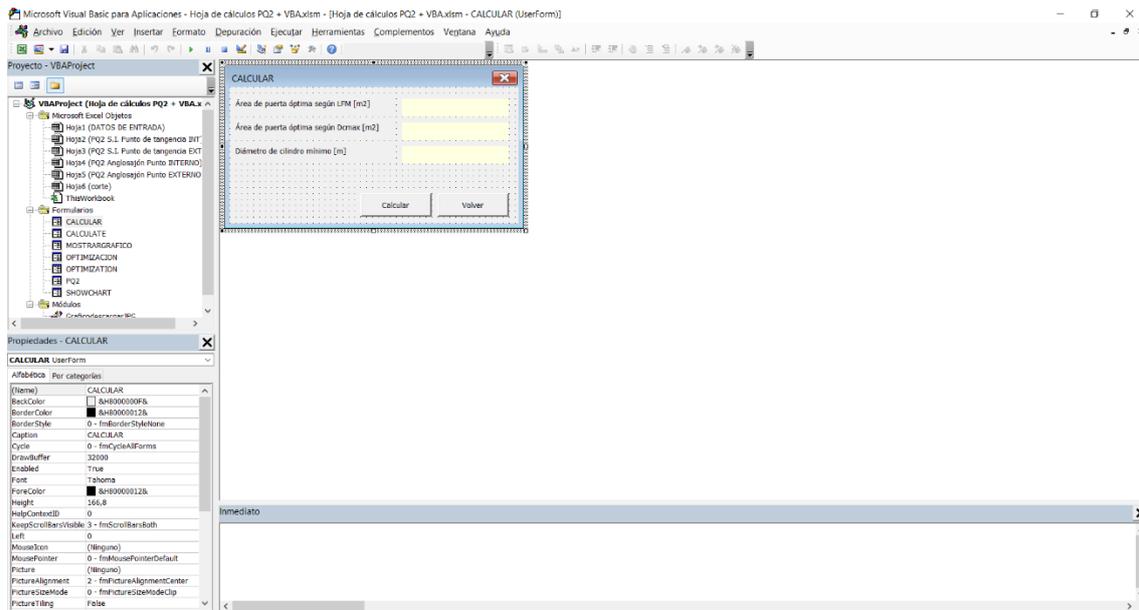
Sheets("PQ2 Anglosajón Punto INTERNO").Visible = False

Sheets("PQ2 Anglosajón Punto EXTERNO").Visible = False

Sheets("corte").Visible = False

End Sub

CALCULAR



Option Explicit

Private Sub CommandButton1_Click()

```
ALFM = ""
ADcmax = ""
Dcmin = ""

CALCULAR.Hide
PQ2.Show False
```

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Dim corta As Double

```
corta = Worksheets("corte").Range("b2").Value
```

```
If corta < Worksheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia INT").Range("c13").Value Then
```

```
    ALFM = Worksheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia INT").Range("e21").Value
    ADcmax = Worksheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia INT").Range("e25").Value
    Dcmin = Worksheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia INT").Range("e23").Value
```

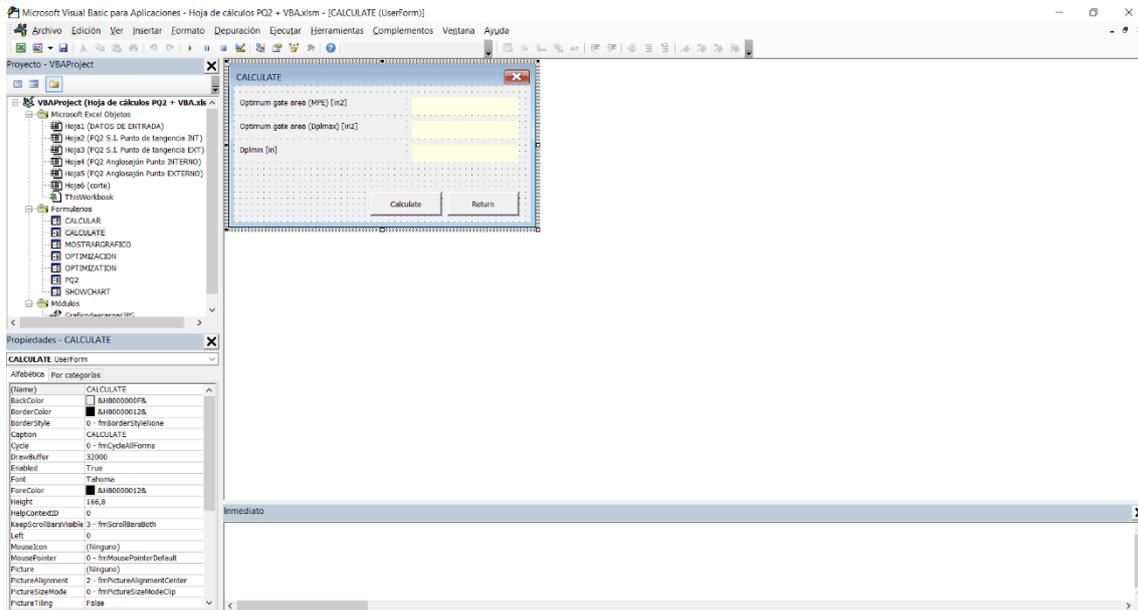
Else

```
    ALFM = Worksheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia EXT").Range("e21").Value
    ADcmax = Worksheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia EXT").Range("e25").Value
    Dcmin = Worksheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia EXT").Range("e23").Value
```

End If

End Sub

CALCULATE



Option Explicit

Private Sub CommandButton1_Click()

AMPE = ""

ADplmax = ""

Dplmin = ""

CALCULATE.Hide

PQ2.Show **False**

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Dim corta As **Double**

corta = Worksheets("corte").Range("b4").Value

If corta < Worksheets("PQ2 Anglosajón Punto INTERNO").Range("c13").Value **Then**

AMPE = Worksheets("PQ2 Anglosajón Punto INTERNO").Range("e21").Value

ADplmax = Worksheets("PQ2 Anglosajón Punto INTERNO").Range("e25").Value

Dplmin = Worksheets("PQ2 Anglosajón Punto INTERNO").Range("e23").Value

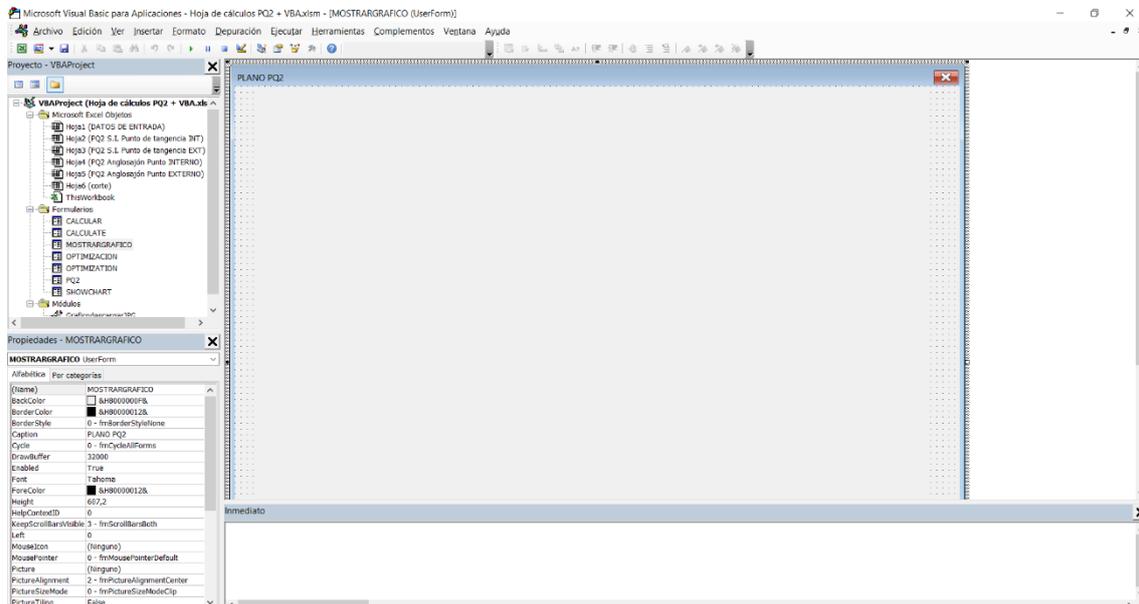
Else

```
AMPE = Worksheets("PQ2 Anglosajón Punto EXTERNO").Range("e21").Value
ADplmax = Worksheets("PQ2 Anglosajón Punto EXTERNO").Range("e25").Value
Dplmin = Worksheets("PQ2 Anglosajón Punto EXTERNO").Range("e23").Value
```

End If

End Sub

MOSTRARGRAFICO



Option Explicit

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
    MOSTRARGRAFICO.Hide
    PQ2.Show False
```

End Sub

```
Private Sub UserForm_Activate()
```

```
    Dim corta As Double
```

```
    corta = Worksheets("corte").Range("b2").Value
```

```
    If corta < Worksheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia INT").Range("c13").Value Then
```

```
        'Guardar imagen
        Call Guardar_GraficoINTERNO
```

```
        'Carga la imagen
        Image1.Picture = LoadPicture(ThisWorkbook.Path & "\PQ2Interno.jpg")
```

Else

'Guardar imagen

Call Guardar_GraficoEXTERNO

'Carga la imagen

Image1.Picture = LoadPicture(ThisWorkbook.Path & "\PQ2Externo.jpg")

End If

End Sub

OPTIMIZACION

Option Explicit

Private Sub CommandButton1_Click()

Label1 = Worksheets("corte").Range("f3").Value

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Label2 = Worksheets("corte").Range("i3").Value

End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()

Label3 = Worksheets("corte").Range("k3").Value

End Sub

Private Sub CommandButton4_Click()

Label1 = ""

Label2 = ""

Label3 = ""

OPTIMIZACION.Hide

PQ2.Show False

End Sub

OPTIMIZATION

Option Explicit

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Label1 = Worksheets("corte").Range("f5").Value
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
Label2 = Worksheets("corte").Range("i5").Value
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton3_Click()
```

```
Label3 = Worksheets("corte").Range("k5").Value
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton4_Click()
```

```
Label1 = ""
```

```
Label2 = ""
```

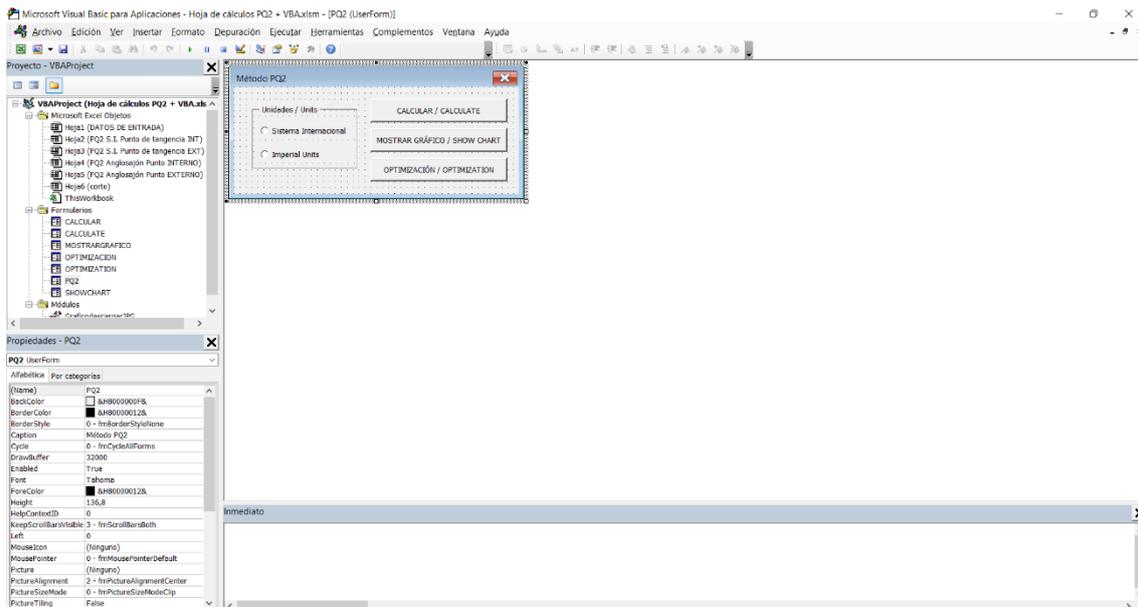
```
Label3 = ""
```

```
OPTIMIZATION.Hide
```

```
PQ2.Show False
```

```
End Sub
```

PQ2



Option Explicit

```
Sub CommandButton1_Click()
```

```
If sistemainternacional = True Then
```

```
    PQ2.Hide  
    CALCULAR.Show False
```

```
ElseIf imperialunits = True Then
```

```
    PQ2.Hide  
    CALCULATE.Show False
```

```
Else
```

```
    MsgBox " Por favor, selecciona unidades / Please, select units", , "Error"
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
If sistemainternacional = True Then
```

```
    PQ2.Hide  
    MOSTRARGRAFICO.Show False
```

```
ElseIf imperialunits = True Then
```

```
    PQ2.Hide
```

SHOWCHART.Show **False**

Else

MsgBox " Por favor, selecciona unidades / Please, select units", , "Error"

End If

End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()

If sistemainternacional = **True** Then

PQ2.Hide
OPTIMIZACION.Show **False**

ElseIf imperialunits = **True** Then

PQ2.Hide
OPTIMIZATION.Show **False**

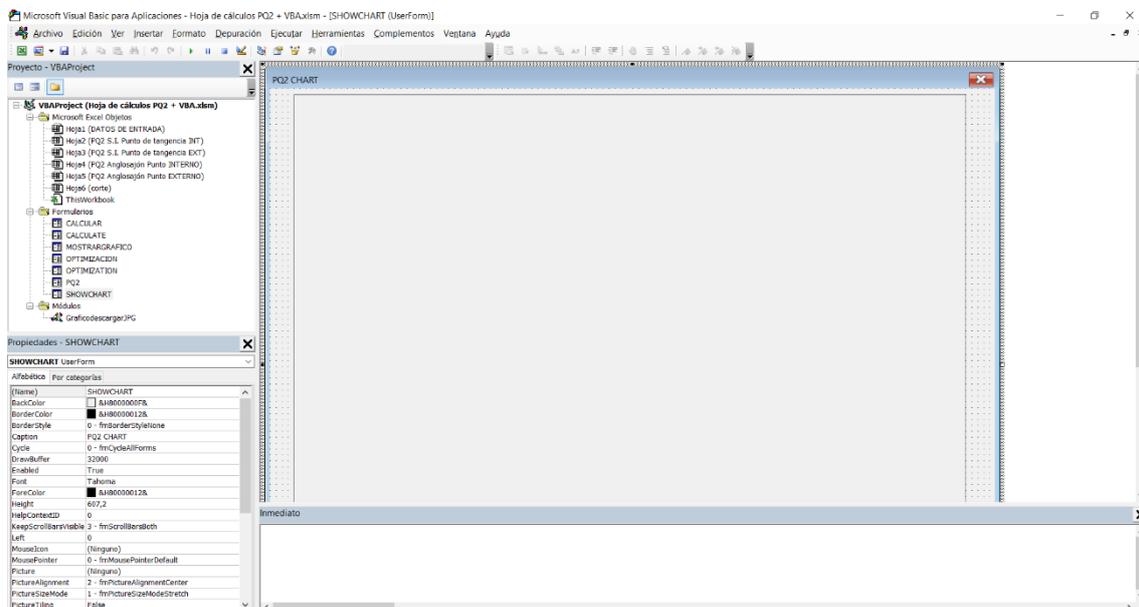
Else

MsgBox " Por favor, selecciona unidades / Please, select units", , "Error"

End If

End Sub

SHOWCHART



Option Explicit

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
SHOWCHART.Hide  
PQ2.Show False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Activate()
```

```
Dim corta As Double
```

```
corta = Worksheets("corte").Range("b4").Value
```

```
    If corta < Worksheets("PQ2 Anglosajón Punto INTERNO").Range("c13").Value Then
```

```
        'Guardar imagen  
        Call Guardar_GraficoINTERNAL
```

```
        'Carga la imagen  
        Image1.Picture = LoadPicture(ThisWorkbook.Path & "\PQ2Internal.jpg")
```

```
    Else
```

```
        'Guardar imagen  
        Call Guardar_GraficoEXTERNAL
```

```
        'Carga la imagen  
        Image1.Picture = LoadPicture(ThisWorkbook.Path & "\PQ2External.jpg")
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

Graficodescargar.JPG

```
Option Explicit
```

```
Public Sub Guardar_GraficoINTERNO()
```

```
With ThisWorkbook.Sheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia INT").ChartObjects("Gráfico 2")
```

```
    .Activate  
    .Chart.Export ThisWorkbook.Path & "\PQ2Interno.jpg"
```

```
End With
```

```
End Sub
```

```
Public Sub Guardar_GraficoEXTERNAL()
```

```
With ThisWorkbook.Sheets("PQ2 S.I. Punto de tangencia EXT").ChartObjects("Gráfico 1")
```

```
.Activate  
.Chart.Export ThisWorkbook.Path & "\PQ2Externo.jpg"
```

End With

End Sub

```
Public Sub Guardar_GraficoINTERNAL()
```

```
With ThisWorkbook.Sheets("PQ2 Anglosajón Punto INTERNO").ChartObjects("Gráfico 1")
```

```
.Activate  
.Chart.Export ThisWorkbook.Path & "\PQ2Internal.jpg"
```

End With

End Sub

```
Public Sub Guardar_GraficoEXTERNAL()
```

```
With ThisWorkbook.Sheets("PQ2 Anglosajón Punto EXTERNO").ChartObjects("Gráfico 1")
```

```
.Activate  
.Chart.Export ThisWorkbook.Path & "\PQ2External.jpg"
```

End With

End Sub