

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Estudio de la variabilidad del contenido de gas en el aluminio en el proceso de fabricación de llantas



Máster Universitario en  
Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Máster

Joseba Olcoz Larrayoz

Eduardo Gárate (MAPSA) y Fermín Mallor (UPNA)

Pamplona, 20 junio 2016



### *Resumen*

El objeto del presente proyecto consiste en estudiar la variabilidad del gas contenido en el aluminio en el proceso de fabricación de llantas por moldeo a baja presión en la empresa Mapsa. Para ello se realizará un análisis centrado en las primeras etapas del proceso (en las áreas de Fusión y Moldeo), en el que se investigarán cuáles, y de qué modo, son los parámetros ambientales y de proceso que afectan al nivel de gas, y en consecuencia a la colabilidad del aluminio.

Todo ello con la finalidad de implantar medidas correctoras que consigan reducir el número de rechazos de llantas, en controles de calidad, que detectan defectos asociados a niveles inadecuados de gas.

### *Abstract*

The purpose of this project is to study the variability of gas of aluminum in the manufacturing process of aluminum wheels in Low-Pressure Die-Cast in Mapsa factory. This requires an analysis of the early stages of the process (in the areas of Melting and Casting) where will be investigated which are the environmental and process parameters that affect the level of gas, and consequently the castability of aluminum.

All of this, in order to implement corrective actions succeeds in reducing the number of rejections of tires, in quality control, which detect defects associated with inadequate gas levels.

*Palabras clave*    *Keywords*

Aluminio	Aluminum,
Gas	Gas
Microporosidad	Microporosity
Macroporosidad	Macroporosity
Llanta	Rim
Rueda	Wheel
Colabilidad	Castability
Regresión	Regression
ANOVA	ANOVA

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	6
2.	JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS .....	8
3.	MAPSA Y SU PROCESO PRODUCTIVO.....	10
3.1.	¿Quién es Mapsa? .....	11
3.2.	¿Qué es una llanta? .....	12
3.2.1.	Llanta .....	12
3.2.2.	Llanta de primeros equipos.....	13
3.2.3.	Llanta de primeros equipos de aleación de aluminio .....	13
3.2.4.	Llanta de primeros equipos de aleación ligera de aluminio para automóvil ..	14
3.3.	Proceso de fabricación de llantas a baja presión .....	14
3.3.1.	El Aluminio AS-7 .....	14
3.3.2.	Etapas de fusión.....	15
3.3.3.	Etapas de desescoriado-desgasificado .....	18
3.3.4.	Etapas de moldeo .....	19
3.3.5.	Control automático de Rayos X.....	20
3.3.6.	Desmazarotado .....	21
3.3.7.	Tratamiento térmico .....	21
3.3.8.	Mecanizado .....	22
3.3.9.	Test de estanqueidad de helio .....	22
3.3.10.	Equilibrado .....	23
3.3.11.	Pintado y esmaltado.....	23
4.	CONTEXTO TECNOLÓGICO .....	25
4.1.	Defectos en fundición de llantas a baja presión .....	26
4.1.1.	Macroporosidad .....	26
4.1.2.	Microporosidad .....	27
4.1.3.	Películas de óxido .....	29
4.1.4.	Inclusiones exógenas.....	29
4.2.	Problemática actual.....	29
5.	ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL GAS.....	32
5.1.	Ensayo de medición de gas .....	33
5.1.1.	Calibración báscula de densidad .....	34

5.2.	Estudio de gas en la etapa de fundición de los reverberos.....	37
5.2.1.	Estado del arte. ....	37
5.2.2.	Identificación y selección de variables explicativas .....	38
5.2.3.	Obtención de datos .....	40
5.2.4.	Variables explicativas .....	42
5.2.5.	Variable explicada. ....	43
5.2.6.	Modelo regresión para el reverbero .....	48
5.2.7.	Análisis resultados regresión.....	52
5.3.	Estudio de gas en la etapa de desescoriado-desgasificado .....	54
5.3.1.	Factores que generan la variabilidad del gas en las batidoras.....	54
5.3.2.	Caldo de retorno en cuchara.....	55
5.3.3.	Relación entre la altura de retorno y el % de gas tras desgasificar .....	56
5.3.4.	Análisis del ensayo .....	60
5.3.5.	Medidas correctivas .....	60
5.4.	Estudio de gas en la etapa de moldeo .....	62
5.4.1.	Evolución del punto de rocío.....	62
5.4.2.	Nivel de gas dentro del horno.....	63
6.	CONCLUSIONES E IMPACTO DEL ESTUDIO PARA LA EMPRESA.....	66
7.	ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS .....	70
8.	REFERENCIAS.....	73
9.	ANÉXOS .....	75
9.1.	ANEXO 1: Presentación curso de formación vaciadores.....	76

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se desarrolla dentro de un contexto formativo en la Universidad Pública de Navarra (UPNA) de Pamplona como Trabajo Fin de Estudios al Master Universitario en Ingeniería Industrial.

El proyecto se ha llevado a cabo principalmente en la empresa Mapsa S.Coop.L., entidad colaboradora con la Fundación Universidad-Sociedad de la UPNA y donde también se han realizado prácticas curriculares. Asimismo, se ha trabajado y se ha recibido apoyo y seguimiento a través del centro docente de la UPNA.

La empresa Mapsa (situada en el municipio de Orkoien), dedicada a la fabricación de llantas de aluminio a baja presión, se encuentra con problemas en su proceso de fabricación provocados por poseer de manera esporádica niveles inadecuados de gas en el aluminio fundido al inicio de su proceso productivo (en las áreas de Fusión y Moldeo). Por ello, se solicitó la colaboración de un estudiante de la UPNA para llevar a cabo un estudio de la variabilidad del parámetro del gas en las distintas fases del proceso. De este modo, se pretende conocer cuáles son las fases que presentan mayor variabilidad, con el objetivo de introducir medidas correctivas cuando sea posible. Con ello, el desarrollo del proyecto se centra en el estudio de dicho problema y el proceso llevado a cabo durante todo el análisis del problema.

Para comenzar se realizará una descripción de quién es Mapsa. Se explicará su modelo de fabricación de llantas y el estado en el que se encuentra el problema de estudio al inicio de la investigación. A continuación se expondrá el procedimiento realizado, se mostrará el análisis de los resultados así como las conclusiones obtenidas.

## **2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS**

El porcentaje de gas que contiene el aluminio fundido es uno de los parámetros más importantes a considerar en la producción de llantas. Esto se debe a que dicha variable va a condicionar en gran medida que las llantas superen o no los controles de calidad, ya sean controles para garantizar la seguridad de la llanta o controles que garanticen un buen acabado estético. De este modo, conocer cuáles son las causas y las fases del proceso en el que dicho parámetro posee una mayor variabilidad, permitiría aplicar medidas correctivas, lo que supondría una disminución importante en las llantas rechazadas y, por lo tanto, una mejor eficiencia y rentabilidad global del proceso.

En los últimos años, en el sector del automóvil, con el crecimiento de la competencia y las exigencias de los clientes, se ha producido un aumento en la demanda de productos más exclusivos. Este es el caso de las llantas con acabado diamantado o acabado mate. Dicho tipo de llantas, son más sensibles a los defectos asociados al gas contenido en el aluminio y, en consecuencia, la necesidad de controlar dicho parámetro ha aumentado.

Por ello, el objetivo del proyecto consiste en el estudio de la variabilidad del gas contenido en el aluminio fundido. Para ello, se estudiarán las fases del proceso implicadas y se investigarán cuáles son los parámetros que afectan al nivel del gas, tanto parámetros ambientales (temperatura, humedad...), como de proceso, forma de trabajo de los operarios, tratamientos del aluminio... De este modo, se podrá saber de qué manera se relacionan dichos parámetros con el nivel del gas, cuáles son más relevantes y, por lo tanto, sobre cuales es necesario realizar un mayor seguimiento, para mantener dicho nivel de gas en valores adecuados al proceso de fabricación.

Conseguir mantener el nivel de gas en valores adecuados, tiene como objetivo último reducir el número de rechazos de llantas defectuosas, y en consecuencia mejorar la eficiencia global del proceso de fabricación de llantas en Mapsa, con el correspondiente ahorro económico que esto supone.

### **3. MAPSA Y SU PROCESO PRODUCTIVO**

### 3.1. ¿QUIÉN ES MAPSA?

---

Mapsa S.Coop.L. (en lo sucesivo referido como Mapsa) es una sociedad cooperativa perteneciente al grupo Mondragón, y en concreto al área de automoción de dicho grupo. Se sitúa en Orkoien (Navarra) y centra su actividad industrial en la fabricación de llantas de aleación de aluminio, para primera monta, de distintos tamaños y con distintos acabados estéticos.

Mapsa comenzó su actividad en el año 1957, como una empresa vinculada al grupo Huarte, pero no fue hasta 20 años más tarde, en el año 1977, cuando la empresa fabricó su primera llanta de aluminio por el método de baja presión. Finalmente en el año 1991, Mapsa se adhirió al grupo Mondragón transformándose en una cooperativa con 134 socios.

La incorporación de Mapsa en la Corporación Mondragón ha impulsado su capacidad y sistemas de producción, así como la consolidación industrial en el sector de automoción como proveedor de las principales marcas automovilísticas.



Figura 1. Vista de la planta de Mapsa en Orkoien.

Desde 1995 Mapsa ha multiplicado por cinco su producción hasta superar la cifra de 2.250.000 llantas al año. A finales del 2015 Mapsa contaba con 515 trabajadores (aproximadamente la mitad de ellos cooperativistas). Debido a la creciente demanda del sector, se ha fijado como objetivo para el año 2017, alcanzar la cifra de 2.500.000 llantas.

Hoy en día Mapsa es una empresa de futuro que se encuentra en plena expansión y desarrollo. Son diversos los proyectos planificados a corto y medio plazo para aumentar la capacidad productiva en varias de sus secciones.

La alta capacidad productiva de Mapsa le permite suministrar a un importante número de clientes de automoción como son el grupo PSA (Citroën y Peugeot), siendo estos su principal cliente, General Motors (Opel Y GM) y el consorcio Volkswagen, AUDI y SEAT. No obstante, también suministra en menor medida a otras marcas, como Kia, Renault, Nissan, Toyota, Suzuki o Ford.

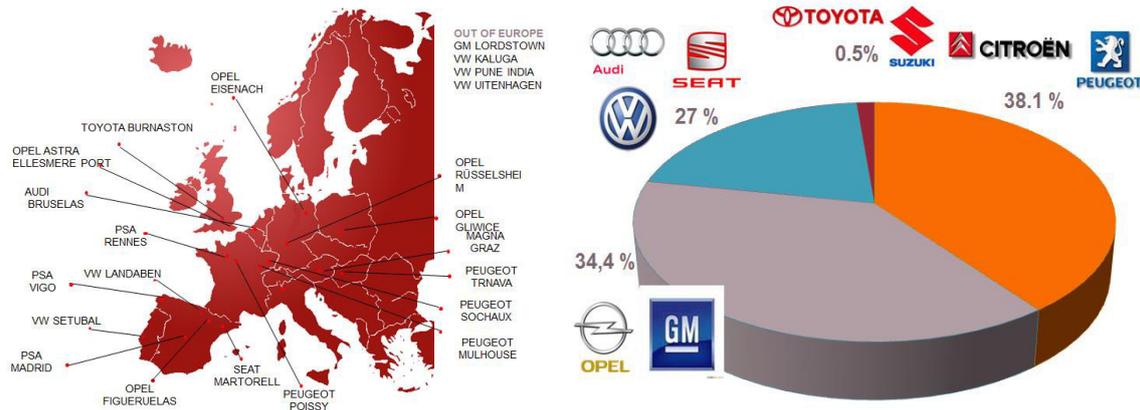


Figura 2. Cartera de clientes de Mapsa.

### 3.2. ¿QUÉ ES UNA LLANTA?

El producto fabricado en Mapsa y cuyo proceso es estudiado en este proyecto, es la llanta de aleación de aluminio. En concreto, la definición exacta sería: “llanta de primeros equipos de aleación ligera de aluminio para el automóvil”.

Fabrican llantas de aluminio de diferentes tamaños, desde 14 hasta 19 pulgadas con una alta calidad y siempre con la garantía de aplicar los más altos controles de exigencia en materia de seguridad y estética.

Actualmente, entorno al 67% de las llantas vendidas poseen un acabado estándar de pintado, un 13% poseen un acabado especial o mate y el 20% restante corresponde a llantas con acabado diamantado, produciéndose además en este último grupo una tendencia creciente en su demanda.

#### 3.2.1. Llanta

La llanta es el elemento del automóvil que sirve de unión entre el neumático y el eje del coche. La llanta y neumático conjuntamente se denomina rueda y principalmente tiene dos funciones: resistir los esfuerzos producidos por la conducción y mantener la presión del aire en el neumático.



Figura 3. Ejemplo de llantas fabricadas en la planta de Mapsa.

La zona de la llanta que queda por debajo del neumático es la rodadura. Dicha zona es más sensible a la porosidad, las ralladuras o los golpes, ya que cualquiera de ellos puede generar una pérdida de presión en el neumático. La superficie de la llanta, que montada en el vehículo queda hacia el exterior, se le denomina Cara-Vista. El lugar donde la llanta se atornilla al eje se denomina hoyas y las ramificaciones entre las hoyas y la rodadura son los nervios o radios. Estos últimos son especialmente difíciles

de moldear debido a su geometría y su tendencia a retener gas y, en consecuencia, a poseer porosidad, es mayor.

### **3.2.2. Llanta de primeros equipos**

El mercado de la llantas se divide según los canales de distribución y exigencias técnicas por el cliente en dos grupos.

Por un lado, encontramos el mercado de llantas de segundos equipos, en el cual el propietario del vehículo es quien, por medio de un intermediario, compra las llantas al fabricante. Este es el caso de las tiendas de recambios, siendo las exigencias técnicas requeridas marcadas por el propio fabricante de la llanta y no teniendo en cuenta al vehículo al que finalmente irá montada.

Por otra parte, se sitúa el mercado de llantas de primeros equipos, en el cual es el fabricante del vehículo quien compra la llantas al fabricante de éstas. En este caso las exigencias mecánicas se definen en función del vehículo al que va dirigido.

Este segundo sector del mercado es el más exigente tanto con el producto como con el proceso. Actualmente los fabricantes de automoción son los más estrictos a la hora de aceptar un fabricante como proveedor, exigiendo que el proveedor haga un gran esfuerzo por adaptarse y mantener su sistema operativo, respetando unas normas de calidad superiores a las llantas de segundos equipos.

Es precisamente en este segundo sector del mercado en el cual Mapsa centra su actividad ya que toda la producción de llantas está destinada para primera monta y en ningún caso su producción se destinada a la venta para segundos equipos.

### **3.2.3. Llanta de primeros equipos de aleación de aluminio**

Las llantas, hasta hace apenas una década, han sido tradicionalmente de acero. Sin embargo, hoy en día, y cada vez más, la tendencia se ha transformado en el uso del aluminio como material para la fabricación de llantas.

Dicha tendencia ha venido propiciada primeramente como una necesidad técnica del vehículo. La tendencia del mercado del automóvil por ofrecer coches que cada vez consuman menos combustible ha llevado a las marcas automovilísticas a introducir en sus vehículos llantas de aleación ligera con el objetivo de ahorrar combustible mediante la reducción de peso.

Asimismo, debido a la reciente crisis económica, la postura de muchas marcas automovilísticas ha sido la de ofrecer nuevos extras y productos de mayor calidad en sus vehículos, siendo las llantas de aluminio uno de estos extras, en lugar de aplicar una reducción de sus precios.

Por todo ello, el mercado de la producción de aluminio está en continuo crecimiento y es por esto que Mapsa se está adaptando y creciendo de manera paralela para intentar adaptarse a la demanda creciente del sector.

### 3.2.4. Llanta de primeros equipos de aleación ligera de aluminio para automóvil

Las llantas son uno de los elementos más importantes y que más influyen en la seguridad de los pasajeros de un automóvil junto con otros elementos denominados *Piezas de alta seguridad*. Así lo entienden los códigos penales y de responsabilidad civil de la mayoría de los países y por ello existen normativas con los requerimientos que han de cumplir.

Hoy en día los fabricantes de automoción y todos sus proveedores tienen una responsabilidad jurídica y civil en caso de que se produzca un accidente por el fallo en alguna de las *Piezas de alta seguridad*. Tal y como se ha mencionado anteriormente, Mapsa fabrica llantas de primeros equipos y dado que está considerada como una *Pieza de alta seguridad*, deberán estar diseñadas para soportar los requerimientos obligatorios impuestos por seguridad además de los requerimientos extras impuestos por el cliente.

### 3.3. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LLANTAS A BAJA PRESIÓN

El proceso de fabricación de llantas comienza con la propia fundición del aluminio, donde se realiza la aleación y se funde el aluminio con sus aleantes. A continuación se desgasifica el aluminio y pasa a la sección de Moldeo a baja presión donde se fabrica físicamente la llanta.

La siguiente etapa consiste en un proceso automático de detección de fallos internos en las llantas mediante un control de rayos X. A las llantas aptas se les realiza un desmazarotado y se les aplica un tratamiento térmico para mejorar las propiedades mecánicas de la llanta.

Después se pasan las ruedas por una célula de mecanizado y se ejecuta una prueba de estanqueidad de helio. Finalmente se les realiza un equilibrado y se pasan por las instalaciones de pintura y acrílico para darles el acabado final.

En las tres primeras etapas del proceso (la de fusión, desgasificado y moldeo), es donde se ha trabajado en el análisis de la variabilidad del gas y por ello a continuación se realiza una descripción en profundidad de dichas etapas.



Figura 4. Esquema del proceso productivo para la fabricación de llantas en Mapsa.

#### 3.3.1. El Aluminio AS-7

Para la fabricación de todas las llantas se emplea una aleación de aluminio AS-7 Mg 0,3 Sr 0,015 Ti 0,09 Br 0,09. Es decir:

- Se emplea aluminio de la Serie 6.000, en concreto una aleación de aluminio con un 7% de silicio para mejorar la solubilidad del aluminio, permitiendo geometrías en moldeo más complejas.

- Contiene un 0,3% de magnesio que actúa como endurecedor para mejorar la resistencia mecánica y facilitar el mecanizado de la llanta.
- Contiene un 0,015% de estroncio que actúa como modificador para evitar que el silicio solidifique en forma de aguja, lo cual sería perjudicial.
- Contiene entre un 0,08% y un 0,01% de titanio y boro, cuya función es afinar el tamaño del grano del aluminio con el objetivo de mejorar la resistencia y aumentar su elasticidad. Esto permite obtener un mayor alargamiento en el ensayo de tracción.

Gracias a la alta capacidad de reciclaje de este material, el aluminio empleado en la fundición posee distintos orígenes:

- Aluminio puro (el 60% del material de cada colada)
  - o Se suministra en forma de lingotes con una pureza del 99.85% y cuya calidad está homologada. La cantidad de hierro máximo permitido es inferior al 0,10% (llamado P.0610), dado que unos rangos de hierro en Aluminio entre 0,2% y 0,25%, fragiliza considerablemente la rueda. El aluminio consumido se compra a través de un intermediario en el LME (London Metal Exchange) y proviene de Egipto, Mozambique, Azerbaiyán, Rusia, Emiratos Árabes, Arabia Saudí y Sudáfrica próximamente.
  - o El precio de la tonelada de aluminio suele rondar en torno a 1.500 €.
- Material reciclado (entorno al 40% del material de cada colada)

El aluminio reciclado, que se vuelve a fundir posee dos orígenes: la chatarra y la viruta.

  - o Chatarra (supone un 10% de cada colada): compuesto por las llantas defectuosas (incluso aunque estén pintadas) y las mazarotas principalmente. Dicho reciclaje es un proceso homologado lo que garantiza que las propiedades finales de las ruedas no se vean perjudicadas.
  - o Viruta (un 30% de cada colada): originada en la etapa de mecanizado de precisión, es recogida de manera automática hasta un silo de almacenaje para fundirla en los hornos Morgan. Este es un proceso desarrollado en Mapsa y también está homologado por todos sus clientes. El reciclaje de la viruta supone un ahorro anual de un 1 millón de euros en la compra de materia prima.

### **3.3.2. Etapa de fusión**

Mapsas es una de las pocas empresas del sector que fabrica llantas de primera monta partiendo de aluminio puro y realizando ellos mismos la aleación in situ. Para garantizar la calidad a sus clientes se analiza con un espectrómetro en el laboratorio de fusión una probeta del material fundido y aleado para asegurarse que la presencia y cantidad de aleantes es la adecuada. En dicho laboratorio se realiza también el control del gas en el que se centra el proyecto.

El procedimiento llevado a cabo para realizar la fusión del aluminio consta de varios equipos y etapas. La planta de fusión está formada por 6 crisoles Morgan, dos líneas en

paralelo (compuestas cada una por una torre fusora, un horno RMA y un reverberos RAN) y cuatro desgasificadoras FDU.

Reverberos RAN

El proceso de fusión comienza en uno de los reverberos RAN. Existen dos reverberos con capacidad de almacenaje de 31,5 Toneladas cada uno y capacidad fusora de 2 Tn/hora. Ambos funcionan de manera intermitente permitiendo una producción continua de aluminio fundido, ya que mientras uno suministra de aluminio a la línea productiva, el otro está siendo llenado mediante un sistema de regueras o canaletas.

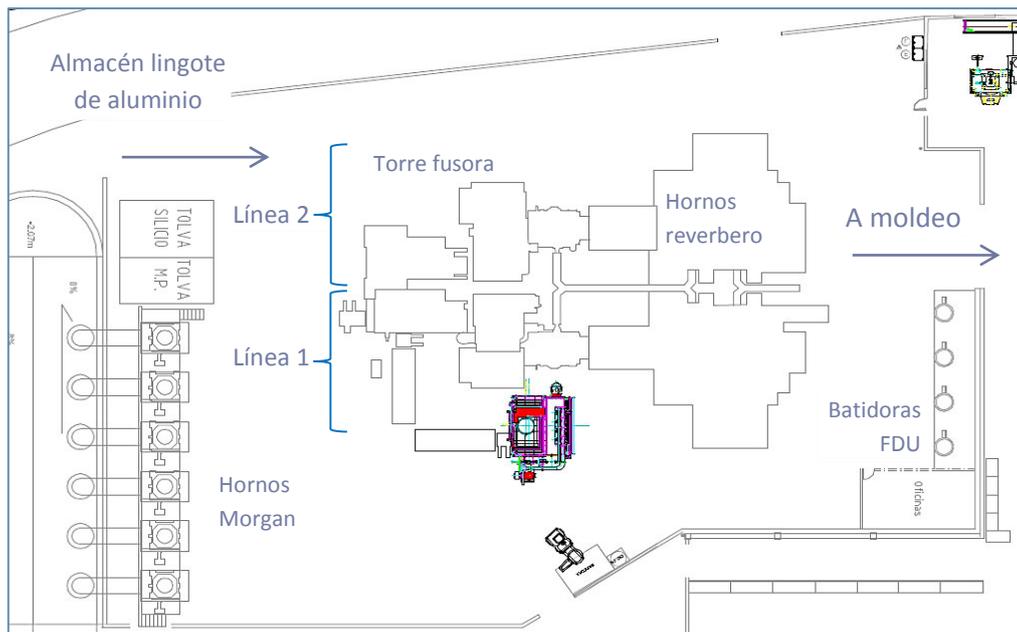


Figura 5. Lay Out de la nave de Fusión

Los reverberos poseen 6 tapones porosos cada uno, mediante los cuales se inyecta nitrógeno de manera continua con el objetivo de homogeneizar el caldo y reducir la cantidad de gas. Asimismo, en ciclos de 15 min se aumenta el caudal del nitrógeno para producir agitación en el caldo y aumentar su efecto.



Figura 6. Horno reverbero (a la izquierda) y torre fusora (a la derecha).

Para preparar cada colada, primero se introducen 75 kg de silicio (por cada Tonelada de aluminio a fundir) en el reverbero, antes de meter el aluminio, para asegurarse de que esté

completamente seco y de este modo evitar el riesgo de explosión que podría darse al contactar el aluminio fundido con la humedad contenida en el silicio.

A continuación se realiza la carga en frío, lo que supone introducir 6 toneladas de aluminio. El reverbero calienta la cúpula a unos 950°C, de modo que el aluminio se funde por el calor radiante reflejado por la bóveda.

### Torres fusoras

---

La mayor parte del aluminio se funde en las torres fusoras. Para ello, se añade a las torres mediante carro vibrante los lingotes, las llantas y las mazarotas. Existen dos torres con capacidad fusora de 3 Tn/hora que trabajan de manera simultánea. Dichos equipos poseen forma de reloj de arena, la cual provoca una acumulación de material en el embudo central. Dado que los quemadores se encuentran en la parte inferior, se evita que la llama incida directamente sobre el aluminio, reduciendo la aparición de escoria (aunque no se evita generar un 0,5%). De este modo el aluminio se funde gota a gota hasta caer a la parte inferior de la torre.

### Hornos RMA

---

Como consecuencia del diseño de las torres fusoras, el aluminio se funde a la temperatura de humos, lo que supone que el aluminio no esté sobrecalentado. Por eso, es necesario elevar su temperatura en una etapa posterior mediante un horno RMA para evitar que el aluminio se solidifique en el trayecto desde las torres fusoras a los reverberos a través de las regueras. Existen dos hornos RMA situados a la salida de cada torre fusora y con ellos se sobrecalienta el aluminio hasta los 750 °C. No obstante, es necesario considerar que tiene el inconveniente de que la llama incide directamente sobre el aluminio y genera escoria.

### Crisoles Morgan

---

Por otro lado, y de manera simultánea, en los crisoles Morgan se funde la viruta a una temperatura de 800 °C. Se utiliza una tolva en cuya parte inferior se coloca un cartón para evitar que la viruta caiga. Luego se coloca la tolva sobre el crisol, se quema el cartón y cae la viruta. Todo el proceso de fundición de la viruta tiene una duración de 2 horas.

El principal inconveniente del empleo de la viruta es que posee mucho óxido en su superficie y por eso es necesario limpiarlo. Para ello, se introduce el aluminio fundido en una batidora junto con un desescorriante al cual se adhiere la escoria y óxido generado. Como se trata de una reacción exotérmica que genera vapor, el desescorriante junto con la escoria flota y se puede retirar fácilmente con una espumadera.

Una vez llenado el reverbero con el lingote, las llantas y la viruta reciclada, se espera a que la temperatura del baño suba a 750°C para añadir:

- El estroncio: se añade al final del proceso, ya que tiene “efecto caduco”, es decir, se degrada y pierde sus propiedades con el tiempo que permanece en estado líquido en la aleación de aluminio.

- El magnesio: es preferible añadirlo en ausencia de oxígeno. Además, considerando que la densidad del magnesio es menor que la del aluminio (y flotaría) todo el magnesio se agrupa en una cesta y se sumerge de manera forzada hacia el fondo del reverbero, donde el magnesio no pueda reaccionar con el oxígeno del aire ambiente.
- Todo el aluminio fundido de los reverberos es empleado para llenar los hornos mantenedores de caldo existentes en Moldeo. Para ello se emplea un sistema de carretillas y cucharas con capacidad de 400 kg de caldo. Una vez llenada cada cuchara con caldo procedente del reverbero se introducen 6 varillas de Tibal (aluminio con titanio y boro) para afinar el grano.

### 3.3.3. Etapa de desescoriado-desgasificado

A la salida del reverbero el nivel de gas en el aluminio es demasiado elevado y es necesario reducirlo a un nivel adecuado. Asimismo, posee escoria que es necesario eliminar.

Para conseguir que el proceso de moldeo se realice correctamente, es necesario que el aluminio contenga una cantidad adecuada de gas para que fluya fácilmente. No obstante, un nivel excesivo en gas puede provocar que durante la solidificación en el molde se generen burbujas o poros que perjudiquen las propiedades de la llanta, lo que supone un rechazo de las mismas en los posteriores controles de calidad. Por el contrario, un nivel reducido de gas puede provocar que el caldo no llegue a todas las partes del molde y se generen rechupes. Ambas problemáticas se explicarán en profundidad en el apartado 4.1.

Para controlar que se trabaja con niveles adecuados de gas, se emplea un SPC (Control Estadístico de Proceso). La línea central, y punto ideal para el nivel de gas, se sitúa en 7,5%, el Límite Superior de Control en un 9,5%, y el Límite Inferior de Control en un 5,5%. Sin embargo, poseen unas tolerancias que bajan hasta un 3,5% para el Límite inferior, y que suben hasta un 10.5% para el Límite Superior. Fuera de esas tolerancias no está permitido realizar el llenado de los hornos de Moldeo.

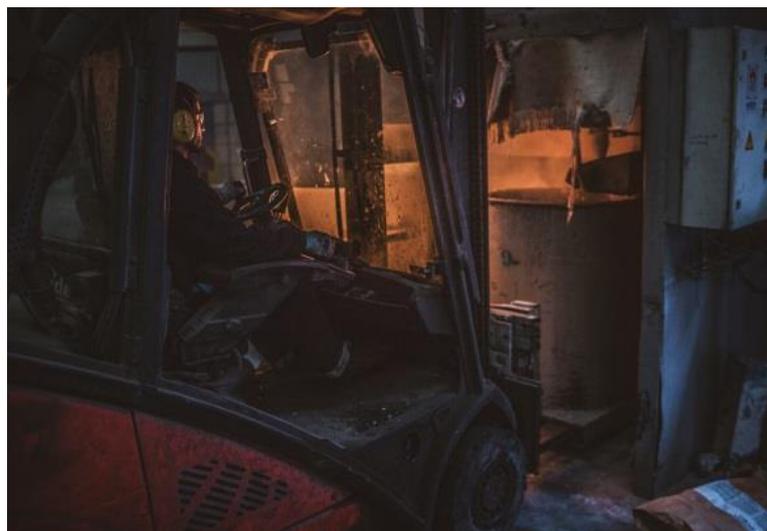


Figura 7. Etapa desgasificado-desescoriado.

El desescoriado y desgasificado del caldo se realizan de manera simultánea. Para ello, se emplean las desgasificadoras FDU o batidoras. Mediante el sistema de carretillas y cucharas, los operarios (denominados vaciadores), dejan una cuchara llena de aluminio fundido procedente del reverbero en una FDU y cogen una cuchara de otra FDU, la cual ya ha realizado el tratamiento, para llenar el horno de una de las moldeadoras.

En el proceso de las batidoras se dan tres fases. Una primera donde se añade el desescoriante COVERAL 6512 (de 150 a 350 gramos) y un caudal de nitrógeno de 11 litros por minuto y se genera un potente vortex durante 30 segundos, el cual permite mezclar el caldo y el desescoriante. A continuación durante un tiempo de 100 a 200 segundos se bate la mezcla para que el desescoriante y el nitrógeno hagan su efecto. Finalmente durante 30 segundos se introduce una paleta que frena el vortex y provoca que la escoria junto con el desescoriante floten, lo que facilita su limpieza con una espumadera.

El tiempo y los caudales empleados se pueden modificar para ajustarse a las necesidades del proceso.

### 3.3.4. Etapa de moldeo

El método de moldeo empleado para la fabricación de llantas en Mapsa es la fundición a baja presión (LPDC). Dicha metodología permite fabricar llantas de alta calidad, con una gran productividad y de manera rentable. Mapsa dispone de 38 moldeadoras distribuidas en 4 líneas.

Una máquina de colada LPDC está constituida por una prensa, un molde y un horno de mantenimiento del caldo de aluminio que se calienta eléctricamente y que se sitúa por debajo del molde.

El molde posee una geometría compleja, formado por varias secciones, tal y como muestra la *Figura 8*: una matriz inferior, un troquel en la parte superior y 4 matrices laterales móviles que permiten el desmoldeo de la pieza.

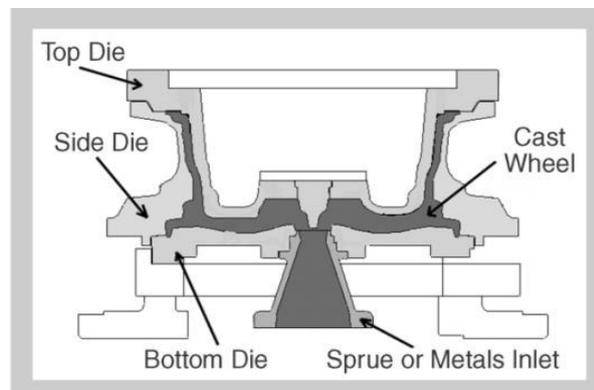


Figura 8. Molde típico para la fabricación de llantas en LPDC. [1]

El proceso de moldeo es cíclico y comienza con la presurización del horno, que contiene el caldo de aluminio, hasta una presión de 1 bar. El molde y el horno se encuentran unidos mediante un tubo, por el que asciende el aluminio fundido cuando se produce el aumento de presión. Un vez enfriado el aluminio, se desmolda abriendo los laterales y elevando verticalmente la matriz superior. La rueda permanece pegada brevemente a la matriz superior (debido a la contracción térmica) y luego se expulsa en una bandeja. A continuación la matriz se cierra y comienza el ciclo de nuevo. Los tiempos de ciclo típicos son de 5 a 6 min.

Un operario llamado coquillero realiza un control visual de la llanta moldeada, elimina las rebabas, acuña el número de colada y mediante un manipulador coloca la llanta sobre una cinta de rodillos que la conduce a la etapa posterior de control de rayos X.

Durante la solidificación es muy importante el control del enfriamiento de la pieza para la calidad del producto. De este modo la primera parte que debe solidificarse es la pestaña de la llanta y la última la mazarota o punto de inyección del aluminio situada en la parte central.



Figura 9. Nave de Moldeo. Se aprecian los hornos y las moldeadoras sobre ellos.

Asimismo, para conseguir una distribución adecuada y sin turbulencias del aluminio a través del molde, generalmente se coloca un filtro desechable (en cada ciclo), que regule el caudal en el tubo que conecta el horno con el molde. En Mapsa sin embargo, emplean un sistema propio que consiste en colocar un tubo extra intermedio, que contiene un filtro cerámico más resistente, que es calentado de manera constante con un soplete, de modo que les permite trabajar durante 300 ciclos sin necesidad de cambiar el filtro. Esto les permite reducir el tiempo de ciclo, reducir la necesidad de mano de obra y, por lo tanto, mejorar la eficiencia del proceso.

### 3.3.5. Control automático de Rayos X

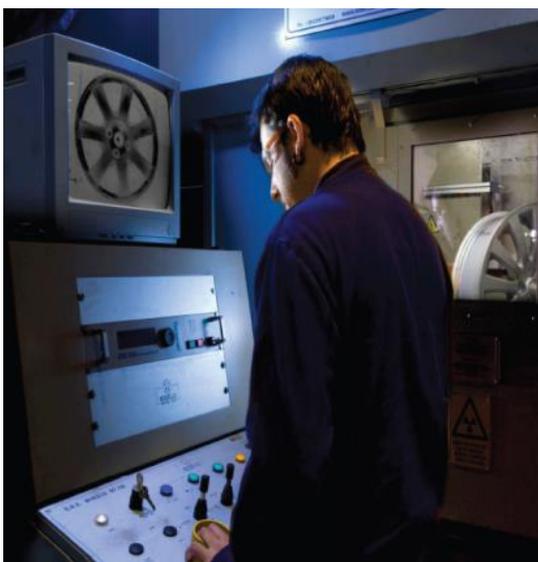


Figura 10. Máquina de rayos X.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la llanta es considerada como una de las *Piezas de seguridad* del automóvil y por eso es necesario garantizar su calidad. Para ello, se hacen pasar todas las llantas por rayos X para analizar la rodadura, las hoyas y los nervios. Es esta última zona en la que se suelen presentar más problemas, ya que si el enfriamiento en el molde no es lo suficientemente rápido, es el primer lugar donde aparecerán los poros. El equipo mediante un sistema automático de detección de poros discrimina la pieza, dándola como pieza OK o pieza NOK.

### 3.3.6. Desmazarotado

Tras pasar el control de rayos las piezas OK pasan al proceso de desmazarotado. En esta etapa se eliminan las mazarotas que contiene la pieza en bruto. La sección consta de tres células totalmente automatizadas con dos taladros, un robot y un sistema de visión artificial mediante la cual la máquina reconoce la referencia de la llanta y elige la herramienta adecuada para realizar las operaciones. Las mazarotas recortadas se transportan a un contenedor para volver a fundirlas.



Figura 11. Robot de la célula de desmazarotado colocando una llanta en la máquina de taladro (izquierda) y la mazarota de la llanta (derecha).

### 3.3.7. Tratamiento térmico

A continuación las piezas pasan a los hornos de tratamiento térmico para mejorar sus propiedades mecánicas. Se realiza un tratamiento T6 de la aleación A357. Con él se consigue incrementar el límite elástico y la resistencia a tracción. Asimismo, el T6 es ideal para elevar la dureza lo que facilita el mecanizado de la llanta. También al mejorar las características mecánicas de la pieza es posible reducir el peso de la pieza y en consecuencia el consumo del vehículo.

En Mapsa actualmente se trabaja con cuatro líneas de temple continuo o lineal. Es decir, cada lote de llantas pasa continuamente de estación en estación dentro del horno de temple y revenido durante 16 horas. El temple, que en el sector de aluminio es conocido comúnmente por solubilizado, dura 8 horas, mientras que las 8 horas restantes se dividen entre la espera y el revenido, también conocido como maduración artificial.

El revenido tiene como función reducir las tensiones residuales, es decir, reducir la fragilidad provocada por el temple. Una reducción importante de las tensiones puede provocar deformaciones o grietas superficiales, convirtiendo una llanta aparentemente buena a la entrada del tratamiento, en defectiva a su salida. Por eso, existe un nuevo control de calidad a la salida del tratamiento térmico.

### 3.3.8. Mecanizado

El proceso de mecanizado se realiza a todas las llantas y es necesario para conseguir adaptarse a las tolerancias dimensionales exigidas por el cliente. Disponen de 8 células automáticas y 3 líneas manuales. Cada célula tiene un torno, un centro de mecanizado, un sistema de visión artificial y un robot. Las tres líneas manuales se dividen en una corta que tiene un torno y un centro de mecanizado y dos largas que tiene dos tornos y un centro de mecanizado.



Figura 12. Célula de mecanizado automática.

Las llantas se mecanizan en 3 operaciones:

1. Se mecaniza la rodadura interior, la cara de apoyo, el diámetro central y la mitad de la rodadura exterior.
2. Se mecaniza la otra mitad de la rodadura exterior y la zona de embellecedor.
3. Se mecaniza los agujeros de amarre y el agujero de la válvula.

Posteriormente las llantas pasan por un túnel de lavado y desengrasado.

Toda la viruta generada se recoge y se traslada mediante unos arpones a un silo para posteriormente fundirla en los hornos Morgan.

### 3.3.9. Test de estanqueidad de helio

Con el fin de asegurar que la pieza no tiene ningún tipo de fugas se realiza el control de estanqueidad. Para ello, se cierra el volumen de la llanta en una doble campana. Se hace vacío en las dos partes de las campanas y se inyecta el helio en la zona de la rodadura, que es donde va alojado el neumático. A continuación, mediante un espectrómetro, se comprueba la cantidad de helio que hay en la parte interna de la llanta. Si ese valor es inferior a un valor establecido, la llanta se da por buena, si es superior se da por mala. Se utiliza helio porque el

tamaño de la partícula de helio es inferior a la del aire, de modo que si la llanta es estanca para el helio, también lo será para el aire.

### 3.3.10. Equilibrado

En este proceso se controla que la llanta esté equilibrada. Si el resultado obtenido es inferior al especificado por el cliente, la llanta se da por buena, en caso contrario la llanta se da por mala.

En el caso de las defectuosas, algunas se pueden recuperar mediante un proceso aprobado por el cliente. Con un torno se elimina material con el objetivo de conseguir equilibrar la llanta.

Por último, después de todo el proceso y antes de pasar a darle el acabado final, la llanta pasa por uno de los 8 puestos donde se realiza un control visual.

### 3.3.11. Pintado y esmaltado

El último proceso consiste en darle a la llanta un acabado estético. Mapsa ofrece a sus clientes tres acabados distintos: pintado estándar, diamantado o acrílico y color mate. Actualmente entorno al 67% de las llantas vendidas poseen un acabado estándar de pintado, un 13% poseen un acabado mate y el 20% restante corresponde a llantas con acabado diamantado, produciéndose además en este último grupo una tendencia creciente en su demanda.

El proceso de pintado estándar está totalmente automatizado. Primero se lava la llanta y recibe un tratamiento químico con sales de Zirconio para proteger el aluminio de la corrosión. Este túnel de pre-tratamiento tiene 13 etapas. A continuación se aplica uniformemente una capa de pintura polvo epoxi (poliéster) de un espesor uniforme (140-160  $\mu\text{m}$ ). Posteriormente las llantas pasan al horno de polimerizado donde alcanzan una temperatura de 190  $^{\circ}\text{C}$  haciendo que las resinas que contienen la pintura en polvo polimericen y se adhieran al aluminio.



Figura 13. Línea automática de pintado pintura.

Después de la polimerización de la capa epoxi, la llanta entra en la cabina de aplicación de color de la llanta, generalmente gris. A continuación, después de 5 minutos de espera, se aplica una capa de barniz transparente.

Estas dos capas, la de pintura y barniz, se aplican en líquido, y el proceso empleado es el llamado “wet to wet”, ya que se aplican las dos capas en estado húmedo.

A continuación la llanta entra al horno de polimerizado para que estas capas se adhieran a la imprimación aplicada anteriormente. La temperatura para la polimerización es ligeramente inferior a la aplicada en el secado de la capa de imprimación, por lo que se emplea un horno distinto al anterior.

Posteriormente hay un túnel de enfriamiento dónde además se realiza el control final de la llanta, en la que hay 3 verificadores controlando los defectos superficiales de la misma. Si la llanta es OK se paletiza y se manda al cliente.

Para el acabado diamantado o acrílico, se añade una etapa más al proceso de pintado estándar, ya que una vez pintada la llanta, se mecaniza la cara vista o alguna parte de ella con el objeto de que queden al descubierto zonas de metal vivo que tienen aspecto espejo dando dicho efecto a la llanta. Para protegerla es necesario aplicar un barniz acrílico en polvo, para lo cual Mapsa dispone de una línea específica para la aplicación de dicho barniz.

Cabe destacar que a este tipo de llantas, son las únicas a las que se les realiza un mecanizado de la cara vista, ya que el acabado final del resto de llantas es el que posee la llanta a la salida del molde.

Finalmente, para conseguir el acabado mate, a las llantas diamantadas, se les aplica una nueva capa de pintura que reduce el efecto brillo de la llanta, dándole un efecto mate.

## **4. CONTEXTO TECNOLÓGICO**

#### 4.1. DEFECTOS EN FUNDICIÓN DE LLANTAS A BAJA PRESIÓN

Como ya se ha mencionado anteriormente, las llantas son un elemento de seguridad muy importante para el vehículo y, por tanto, asegurar una buena calidad en su fabricación, es imprescindible. Algunos de los requisitos que deben cumplir son:

- Poseer una adecuada resistencia mecánica al impacto y a la fatiga.
- Mantener la estanqueidad al aire, ya que la llanta junto con el neumático es un elemento a presión.
- Debe poseer un acabado estético de alta calidad.
- Debe cumplir con las tolerancias geométricas y el equilibrio de rotación, que además cada vez son más estrictos.

Por tanto, cualquier elemento que impida cumplir cualquiera de estos requisitos se considerará un defecto que podrá ocasionar el rechazo de la llanta en alguna de los controles del proceso productivo.

Como consecuencia de todos estos requisitos, unido a una demanda creciente y una mayor exigibilidad en los requerimientos, la formación y predicción de los defectos, junto con otros métodos para eliminarlos, es un campo de interés, abierto a la investigación y en el que se inserta este proyecto.

A continuación se describen cuatro defectos generados en el proceso de fundición de aluminio para la fabricación de llantas a baja presión y que pueden provocar el incumplimiento de alguno de los requisitos antes señalados. Estos defectos son la macroporosidad, la microporosidad, las películas de óxido y las inclusiones exógenas [1].

##### 4.1.1. Macroporosidad

La macroporosidad se genera en la etapa de moldeo. La forma más habitual en la que se produce es por la aparición de un rechupe. Éste se genera cuando a alguna parte del molde no llega suficiente metal líquido para compensar la contracción volumétrica del metal al solidificarse (aproximadamente del 4% para el aluminio). Es decir, cuando una zona líquida queda rodeada por completo por una región sólida, al solidificar el líquido, y reducir su volumen, se genera una región hueca o poro.

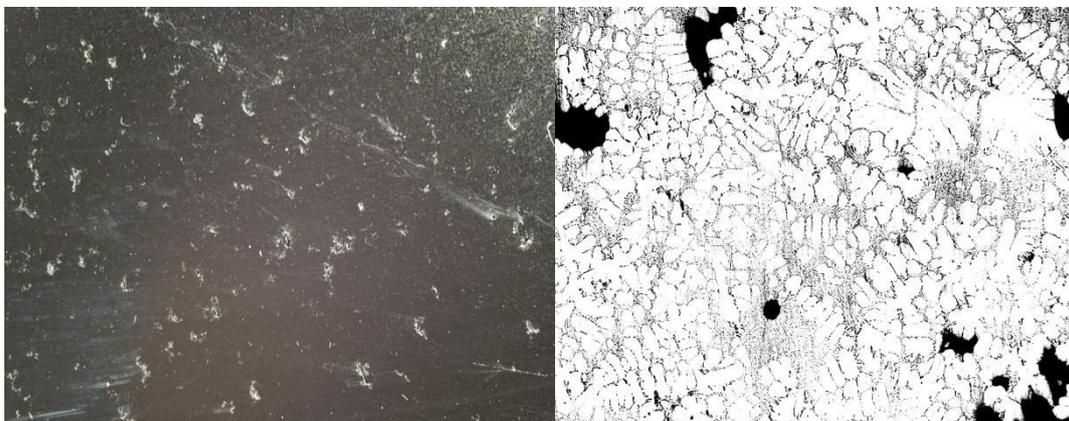


Figura 14. Ejemplo macroporosidad o rechupe y micrografía de rechupe. [2]

A priori, esta solidificación irregular puede generarse por dos causas. Por un lado, como consecuencia de un diseño erróneo del molde o la llanta o por una mala selección de los tiempos y aplicación de las refrigeraciones. Por otro lado, un bajo nivel de hidrógeno contenido en el caldo reduce su fluidez, provocando una solidificación prematura.

La macroporosidad suele aparecer generalmente en la zona situada entre los nervios y la rodadura y afecta a la resistencia de la rueda a fatiga y al impacto y, por lo tanto, es necesario fijar tolerancias máximas para la macroporosidad, es decir, un tamaño máximo para esos defectos.

Además, es común que la macroporosidad se produzca en la superficie de la llanta, lo que puede generar un defecto estético. Si por el contrario, la macroporosidad aparece en la rodadura de la llanta, esta puede ocasionar un fallo por fuga de aire.

Recientemente los defectos generados por macroporosidad se han visto reducidos considerablemente, gracias al empleo de software informático de simulación de flujos de calor tanto para el molde como para el proceso de solidificación de la rueda.

#### 4.1.2. Microporosidad

Como su propio nombre indica, la microporosidad se corresponde con la porosidad de pequeño tamaño (<300 micras de diámetro). Aunque dicho defecto aparece en el área de Moldeo, el origen que lo provoca se encuentra principalmente en el área de Fusión.

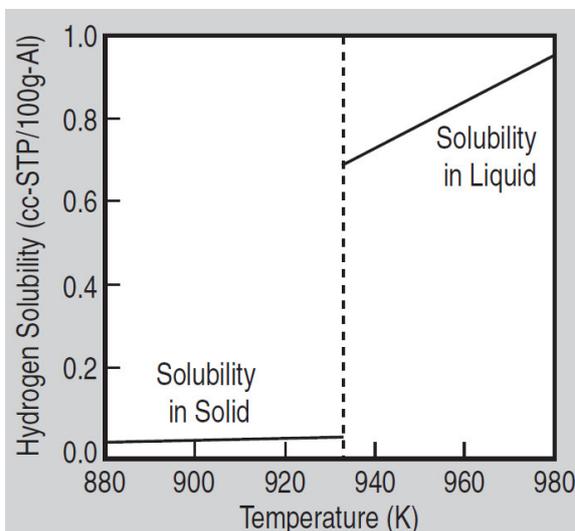


Figura 15. Solubilidad de Hidrógeno en el aluminio en función de la temperatura. [1]

solubilidad, aproximadamente de 0,69 cm<sup>3</sup>/100 g Al.

Sin embargo, la solubilidad del aluminio en estado sólido es bastante pequeña, aproximadamente 0,036 cm<sup>3</sup>/100 g Al. Por eso, a medida que el líquido solidifica, el exceso de hidrógeno, hasta ese momento diluido en el caldo de aluminio, abandona al aluminio pudiendo generar cavidades huecas o poros.

El aluminio en estado líquido tiene la característica de poseer una alta afinidad con el oxígeno de las moléculas de agua contenidas en el aire ambiente en forma de vapor de agua o humedad. En consecuencia se produce la siguiente reacción de oxidación, en la cual se liberan átomos de hidrógeno que son disueltos por el aluminio:



Durante el tiempo de contacto del aluminio con el aire ambiente, la cantidad de hidrógeno contenido en el caldo aumentará hasta alcanzar el límite de

Dichos poros aparecerán si el hidrógeno no encuentra una vía de escape a través del aluminio (cuando el aluminio se encuentra en estado sólido o semi-sólido) y si la presión parcial del hidrógeno es superior la presión local del líquido interdendrítico.

Las dendritas son como pequeños granos que se producen en la nucleación, la primera etapa del proceso de solidificación del aluminio. Luego estos núcleos o dendritas van aumentando su tamaño. El material líquido que queda entre las dendritas tiene una presión parcial (como fluido que es). Si la presión parcial del hidrógeno es superior a la del aluminio líquido (que aún no ha solidificado) se genera el poro.

Algunos de los problemas más comunes asociados con la microporosidad son de naturaleza estética, ya que los micro-poros forman irregularidades sobre la superficie pintada de la rueda. Asimismo, el problema se agrava en ruedas con acabados que requieren de un mecanizado de la cara vista, como es el caso de las llantas de Mapsa con acabado diamantado o mate, ya que además saca a la vista los micro-poros situados justo debajo de la superficie. Asimismo, la microporosidad también puede afectar a las propiedades mecánicas y rendimiento de la rueda a fatiga, especialmente cuando se generan poros en la intersección entre el eje y los radios.

De manera general la macro y micro porosidad se pueden distinguir mediante un análisis visual. Mientras que la macroporosidad suele aparecer en pequeñas agrupaciones y con forma irregular (Ver *Figura 14*), la microporosidad suele poseer una forma esférica y suele aparecer de manera aislada (Ver *Figura 16*).

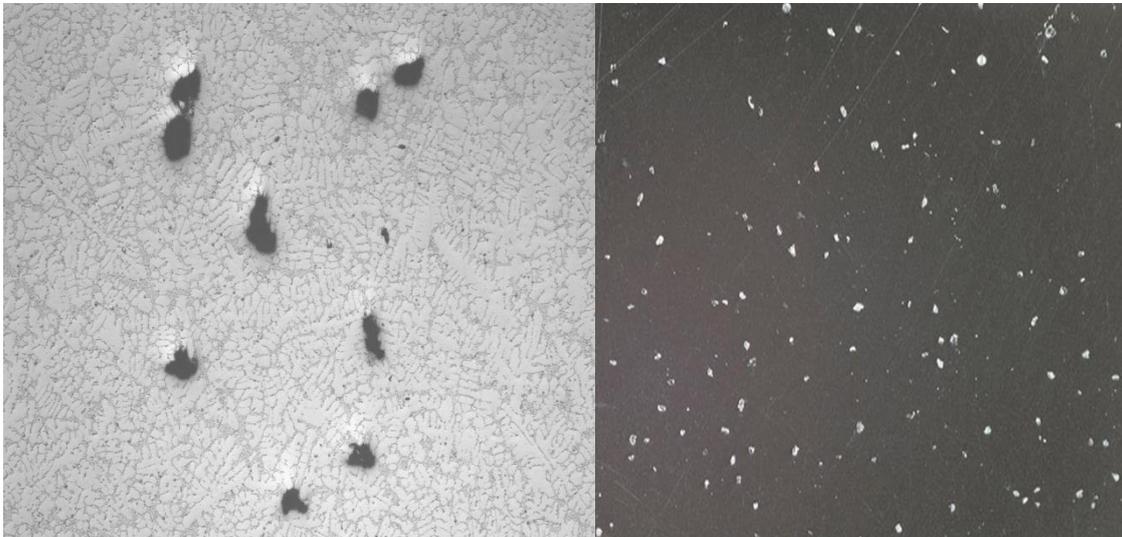


Figura 16. Ejemplo microporosidad y micrografía de micro-poros. [2]

Normalmente, al aumentar la distancia entre los poros y la superficie, el tamaño de estos últimos suelen crecer y se pueden confundir por su tamaño con la macroporosidad pero su forma esférica y que aparecen aislados permiten identificarlos adecuadamente.

Aunque la cantidad de hidrógeno absorbido es un factor fundamental a considerar en el análisis de la microporosidad, no es el único, ya que las condiciones de la solidificación que se dan en el molde influyen también en la generación de micro poros.

#### **4.1.3. Películas de óxido**

La aleación de aluminio cuando está en estado líquido, al entrar en contacto con una superficie o con el aire se oxida formando una película delgada de óxido sobre la superficie expuesta del metal.

Si en el proceso de llenado del molde se producen turbulencias, esto puede provocar el arrastre de películas de óxido al interior del metal fundido y provocar defectos durante su solidificación. Por ello, es muy importante regular el flujo del aluminio a su entrada al molde. En Mapsa emplean un filtro cerámico (en lugar de uno desechable) que permite trabajar durante 300 ciclos sin necesidad de cambiar el filtro. Sin embargo, es necesario calentarlo constantemente mediante un soplete, el cual puede generar un punto de calor a la entrada de la llanta, pudiendo generar fallos de micro o macroporosidad por una inadecuada distribución del calor.

A menudo los fallos en la estanqueidad de la llanta se asocian con las películas de óxido. Asimismo, las películas de óxido pueden actuar como concentrador de tensiones donde se inicien las grietas por fatiga.

#### **4.1.4. Inclusiones exógenas**

Por último, se encuentran los defectos asociados a las inclusiones exógenas. Las inclusiones exógenas son todas las partículas o elementos ajenos a la aleación, que han sido arrastrados por el caldo durante el proceso de fundido. Estas pueden proceder de revestimientos de hornos, suciedad de las herramientas que entran en contacto con el caldo etc.

Dependiendo de su ubicación y tamaño, y del diseño de las ruedas, estas inclusiones pueden limitar las propiedades mecánicas y resistencia a la fatiga, así como llevar a defectos estéticos.

Nuevamente los filtros colocados a la entrada de los moldes resultan eficaces en la eliminación de este tipo de inclusiones.

### **4.2. PROBLEMÁTICA ACTUAL**

---

En el proceso productivo de Mapsa, los defectos asociados a las películas de óxido y a las inclusiones exógenas se encuentran mayormente controlados. Como ya se ha indicado anteriormente, el filtro cerámico situado a la entrada de cada molde posee una doble función. Por un lado, controla el flujo del caldo reduciendo los defectos generados por las películas de óxido. Por otro lado, sirve para filtrar las inclusiones exógenas. Asimismo, al emplear aluminio y aleantes homologados se aseguran que los elementos que forman la aleación sean los correctos y con el espectrómetro, controlan que su proporción sea la adecuada.

Sin embargo, los defectos asociados a la macro y micro porosidad siguen siendo un problema relevante. En ambos casos la causa principal que lo genera es un nivel inadecuado de gas contenido en el caldo del aluminio.

Por un lado, un nivel de gas demasiado bajo puede originar rechupes dentro del molde que generen macroporosidad. Y si por el contrario el nivel de gas es excesivamente alto, se genera la microporosidad. Por ello, es fundamental controlar que en todo momento el nivel de gas se encuentre dentro de un intervalo óptimo que consiga reducir ambos defectos.

Además, en el caso de la microporosidad, el problema se ha agravado en los últimos años ya que las ruedas con acabado diamantado y color mate, más sensibles a este defecto, han aumentado considerablemente su demanda, llegando a suponer más del 30% de las llantas vendidas. Como se ha indicado anteriormente, este tipo de acabado requiere del mecanizado de la cara vista de la llanta y, por tanto, son más sensibles a mostrar los micro-poros situados en la superficie de la llanta así como los que se encuentran justo por debajo de ella, provocando la aparición de mayores defectos estéticos.

Hasta ahora al producir una baja cantidad de llantas con este tipo de acabado, el número de rechazos asociado a este defecto también era pequeño. No obstante, en la actualidad al suponer casi un tercio de la producción, el número de rechazos ha aumentado considerablemente, aumentando en consecuencia los costos asociados. Asimismo, es importante considerar que los defectos estéticos aparecen en la última etapa del proceso por lo que los costos de rechazo de la llanta son muy grandes ya que el producto ya está prácticamente acabado.

Además del aumento de los rechazos en la etapa de pintado, un exceso o defecto de gas también supone un aumento de los rechazos en el análisis de rayos x, justo después de la etapa de moldeo. A continuación se muestra un ejemplo que cuantifica las consecuencias de trabajar con bajos niveles de gas.

La *Tabla 1* muestra cómo se comenzó la primera semana de febrero con el turno de noche del día 1 con un nivel de rechazos del 3,52%, un nivel considerado normal. Dicho nivel fue aumentado hasta el día 3 por la noche alcanzando un 5,42%. En este caso estos altos niveles de defectivo se corresponden con una baja cantidad de gas en el caldo, como consecuencia de un punto de rocío demasiado bajo que durante esa semana no se pudo controlar (dicho problema se explicará más adelante). Como consecuencia los niveles de gas con los que trabajaron en Moldeo en máquina vacía durante esos días bajaron desde un 6% hasta un 3,5%.

Tabla 1. Histórico de defectivo de llantas. [3]

FECHA	TURNOS	BUENAS	MALAS	MALAS RX	TOTAL	% GAS
01/02/16	Noche	3.698	26 0,70%	105 2,84%	131 3,52%	6,0%
02/02/16	Mañana	3.583	30 0,83%	102 2,85%	132 3,65%	↓
02/02/16	Tarde	3.598	29 0,80%	100 2,78%	129 3,56%	
02/02/16	Noche	3.697	29 0,78%	152 4,11%	181 4,86%	
03/02/16	Mañana	3.657	36 0,97%	123 3,36%	159 4,31%	↓
03/02/16	Tarde	3.669	32 0,86%	141 3,84%	173 4,67%	
03/02/16	Noche	3.689	58 1,55%	145 3,93%	203 5,42%	
04/02/16	Mañana	3.701	30 0,80%	95 2,57%	125 3,35%	4,5%
04/02/16	Tarde	3.709	35 0,93%	71 1,91%	106 2,83%	6,0%

Por ello, el día 4 por la mañana se realizaron dos rondas de llenado de los hornos sin desgasificar, es decir en las FDUs únicamente se aplicó desescoriante y se anularon los caudales de nitrógeno, con el objetivo de aumentar de manera rápida los niveles de gas en los hornos. Gracias a esto, se consiguió aumentar los niveles de gas hasta valores próximos al 6,0% y de este modo reducir casi a la mitad los niveles de defectivo.

Con todo lo expuesto anteriormente, se muestra lo importante que es mantener el nivel de gas dentro de un margen adecuado y, en consecuencia, la necesidad de investigar cuales son las causas que provocan estas variaciones.

## **5. ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL GAS**

En las etapas de Fusión y Moldeo existe una gran variabilidad en los niveles de gas, y se desea conocer cuál es el origen del mismo. Por ello, se va a realizar un estudio del nivel de gas siguiendo el orden secuencial de las etapas del proceso, comenzando por el punto de partida del proceso productivo. El estudio abarca tres etapas en total. En primer lugar la etapa de fundición del aluminio. A continuación la etapa de desescoriado-desgasificado, y por último la etapa de moldeo. Cabe destacar que hasta el momento de iniciar el estudio, únicamente se realizaban mediciones de gas tras la etapa de desgasificado, y de manera puntual, y con objetivos productivos en Moldeo. Por lo tanto, apenas se desconocía cuál es la evolución del nivel de gas a lo largo de todo el proceso y su variabilidad.

### 5.1. ENSAYO DE MEDICIÓN DE GAS

El parámetro o variable de estudio es el porcentaje de gas contenido en el caldo del aluminio.

Para medirlo es necesario obtener una probeta del aluminio líquido. Para ello, se toma una muestra de caldo de aluminio con un cazo. Es muy importante asegurarse de que el cazo está bien caliente y seco ya que si contiene humedad, puede falsear el resultado. Asimismo, si entran en contacto gotas de agua con aluminio fundido, se puede generar una pequeña explosión que salpique aluminio y, por lo tanto, muy peligrosa.



Figura 17. Equipo de vacío y probeta de gas respectivamente.

La muestra de aluminio recogida, se vierte en un crisol y se introduce dentro de una cámara de vacío durante 4 min de manera que el aluminio se enfría muy lentamente, ya que el vacío es un buen aislante térmico. Una vez solidificado y enfriado se mide su densidad.

Para ello, se emplea una báscula de densidad. Primero se coloca sobre la báscula la muestra y se pesa. Después se sumerge la probeta por completo dentro de un recipiente con agua, quedando suspendida la probeta por un cordón, sin tocar el fondo. A continuación la báscula mide la fuerza de empuje que ejerce la probeta sobre el agua, para finalmente, a través de la densidad del agua, obtener el valor del volumen desalojado que es igual al volumen de la probeta. Por último con el dato de peso y volumen de la probeta la balanza da como resultado la densidad del aluminio. Para disminuir el error experimental, se han tomado

3 medidas de densidad para cada probeta, empleando su media aritmética como valor para el estudio.

Finalmente para obtener el valor del porcentaje de gas, es necesario comparar la densidad obtenida en la bomba de vacío con el valor de la densidad de la aleación de aluminio enfriado a la presión atmosférica. Dichos valores son 2,586 g/cm<sup>3</sup> para las muestras sacadas del reverbero y de 2,632 g/cm<sup>3</sup> para la muestras después de desgasificar y desescoriar.

En el caso de las muestras del reverbero, la fórmula a aplicar sería:

$$\% \text{ de Gas} = \frac{2,586 - \text{Densidad medida}}{2,586} \cdot 100 \quad (1)$$

Para las muestras tras desgasificar y en Moldeo, la fórmula a aplicar sería:

$$\% \text{ de Gas} = \frac{2,632 - \text{Densidad medida}}{2,632} \cdot 100 \quad (2)$$

### 5.1.1. Calibración báscula de densidad

Debido a la gran cantidad de vibraciones existentes en el Laboratorio de Fusión y ante la creencia de que podría aportar variabilidad al ensayo, se ha optado por calibrar la balanza y comprobar si los datos obtenidos son correctos o no.

Para ello, se han calculado manualmente mediante una tabla Excel la densidad de 79 probetas de aluminio. Dichos valores se han obtenido con una báscula de precisión del Laboratorio de Metalurgia que está bien calibrada, con el que se ha medido el peso y la fuerza de empuje. Con la fuerza de empuje se ha calculado el volumen de la probeta y finalmente su densidad.

Para comprobar que la báscula de densidades mide correctamente se va a realizar un análisis de regresión [4] en el que, el término independiente de la recta deberá ser 0, y la pendiente de la recta de valor 1, para considerar que los datos obtenidos son fiables.

En un modelo de regresión lineal simple se asumen dos hipótesis o condiciones:

- Que los residuos de las muestras siguen una distribución normal de media 0.
- Que los residuos de las muestras no presentan ninguna tendencia ni dependencia entre ellos.

Para validar el modelo de regresión y aceptar los resultados obtenidos, primero es necesario comprobar que las dos condiciones asumidas se cumplen. Para ello, se representan los residuos y se analizan.

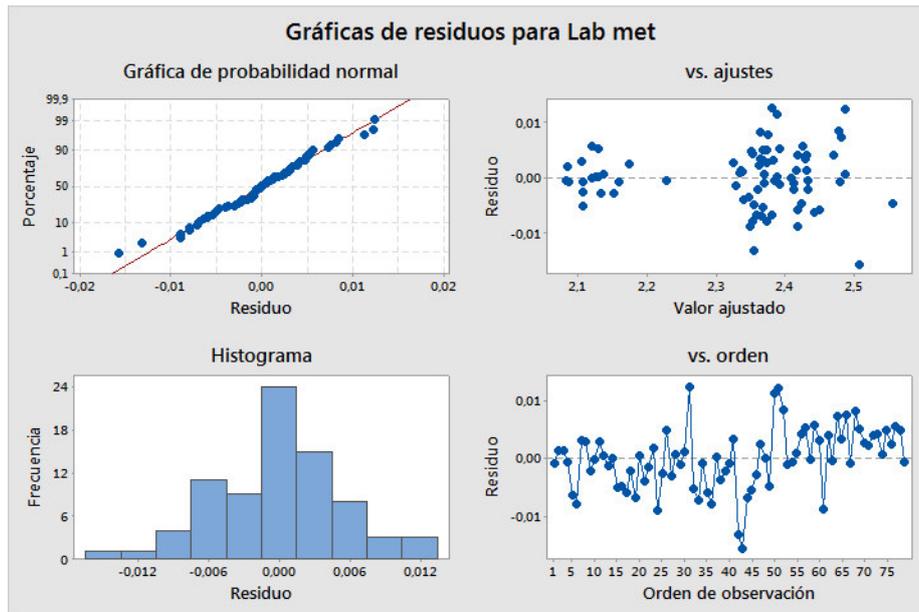


Figura 18. Gráfica de residuos para el modelo de regresión de la balanza.

En los gráficos “vs. Ajustes” y “vs. Orden” puede verse que los residuos se distribuyen sin presentar ningún patrón entorno a la media por lo que no hay problema de heterocedasticidad. Si observamos la evolución temporal los residuos tampoco presentan patrones ni tendencias. Por tanto, se puede decir que los residuos son independientes.

En la “Gráfica probabilidad normal” se observa que los residuos siguen una distribución normal ya que los valores se ajustan mucho a la recta. Además, el “Histograma” posee forma de campana, típica de una distribución normal. Por lo tanto, se asume que los datos siguen una distribución normal.

Al cumplirse ambas suposiciones se valida el modelo de regresión y se pueden aceptar los resultados obtenidos por la regresión.

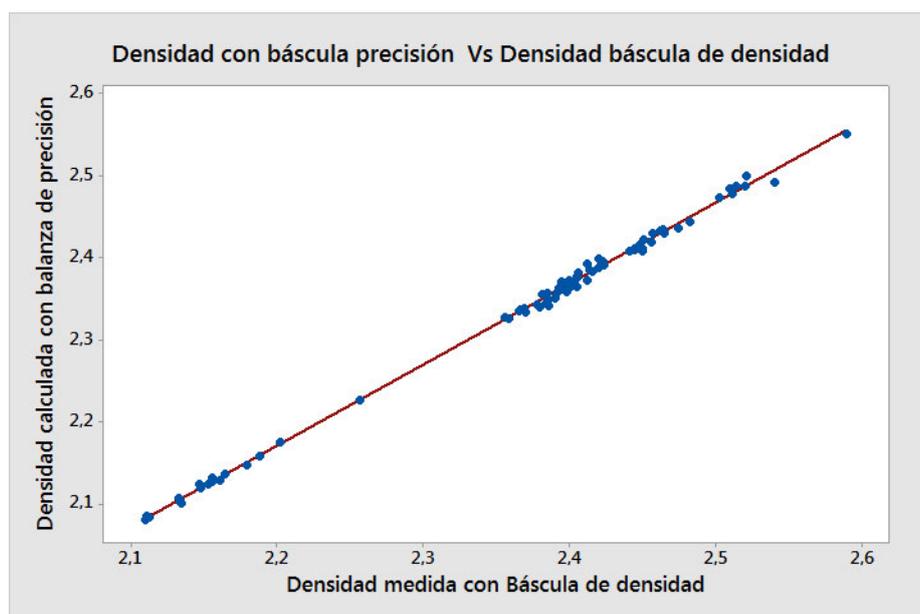


Figura 19. Recta de regresión para la calibración de la báscula de densidades.

El análisis de regresión obtenido se muestra a continuación:

<b>Análisis de regresión: Lab met vs. Báscula densidad</b>						
<u>Análisis de Varianza</u>						
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	
Regresión	1	1,18446	1,18446	41342,27	0,000	
Báscula densidad	1	1,18446	1,18446	41342,27	0,000	
Error	77	0,00221	0,00003			
Falta de ajuste	62	0,00168	0,00003	0,78	0,757	
Error puro	15	0,00052	0,00003			
Total	78	1,18667				
<u>Resumen del modelo</u>						
	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)		
	0,0053526	99,81%	99,81%	99,81%		
<u>Coefficientes</u>						
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	VIF	
Constante	-0,0007	0,0115	-0,06	0,953		
Báscula densidad	0,98724	0,00486	203,33	0,000	1,00	
<u>Ecuación de regresión</u>						
Lab met = -0,0007 +0,98724*Básculadensidad						

Figura 20. Modelo de regresión para la calibración de la balanza.

Se observa que el p valor de la regresión es 0,000, por lo tanto menor que 0,05 (considerando un nivel de confianza del 95%) con lo que la regresión es significativa. Con el modelo queda representada el 99,81% de la variabilidad, es decir prácticamente toda ella.

Analizando el p valor de los coeficientes se observa que el del término constate es 0,953, es decir no se puede rechazar la hipótesis nula de que el coeficiente valga 0. De hecho el valor se aproxima mucho a 0 ya que vale -0,0007. Por otro lado el p valor de la pendiente asociada a la báscula de densidad es 0,000, por lo que se rechaza la hipótesis nula de que sea 0. Por ello, se puede decir que el valor del coeficiente, y en consecuencia, de la pendiente es 0,98724, lo que es aproximadamente 1.

Por lo tanto, se cumple que ambos coeficientes sean 0 y 1 respectivamente y se puede asumir con un nivel de confianza del 95% que los datos obtenidos con la báscula de densidad son correctos.

## 5.2. ESTUDIO DE GAS EN LA ETAPA DE FUNDICIÓN DE LOS REVERBEROS

El punto de partida del estudio del gas en el proceso productivo de Mapsa han sido las dos líneas de fundido del aluminio formadas por los dos hornos reverberos. En concreto, las mediciones de gas se han realizado a la salida del caldo de los reverberos a través de la canaleta que deja caer el aluminio en las cucharas. Se buscará una relación de regresión entre el nivel de gas y varias variables explicativas. Hasta el momento de iniciar el estudio, el número de muestras recogidas en este punto han sido escasas y además presentaban una gran dispersión en los valores obtenidos. Por ello, se realizará un modelo de regresión múltiple con el objetivo de detectar cuáles son las variables explicativas que justifican estas variaciones.

### 5.2.1. Estado del arte.

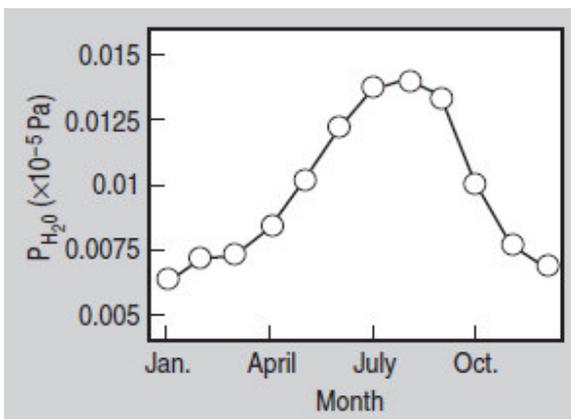


Figura 21. Variación de la presión parcial del agua ambiente en una fundición de ruedas de América del Norte. [1]

Basándonos en la escasa literatura existente sobre el tema [1], se ha tomado como punto de partida de estudio la humedad ambiente contenida en la nave donde se funde al aluminio. Ya se ha explicado anteriormente la tendencia del aluminio a reaccionar con el oxígeno de las moléculas de agua contenidas en el aire y a disolver el hidrógeno resultante, por lo que se parte de que existirá una relación entre el gas medido en el aluminio y la humedad ambiente.

Asimismo, está misma publicación expone que “la experiencia industrial ha demostrado que el aumento de los defectos asociados con la microporosidad [...] se producen generalmente en junio, julio, agosto y septiembre” que son los meses en los que la presión parcial del agua ambiente es mayor. [1]

Tomando dicho estudio como punto de partida, se ha comprobado si esa misma situación también se da en Mapsa. Para ello, se han empleado los datos de humedad relativa y temperatura ambiente, medidos por un equipo cada 10 minutos el cual está colocado a la entrada de aire del quemador de uno de los reverberos desde hace dos años. Ambas medidas junto con la presión atmosférica media dentro de la nave, permiten calcular la presión parcial del agua con la siguiente fórmula:

$$P_v = \frac{\phi \cdot P_{sat}}{100} \quad (3)$$

donde:

- $\phi$ : es la humedad relativa expresada en %.
- $P_{sat}$ : es la presión de saturación del agua en bares para la temperatura en °C.

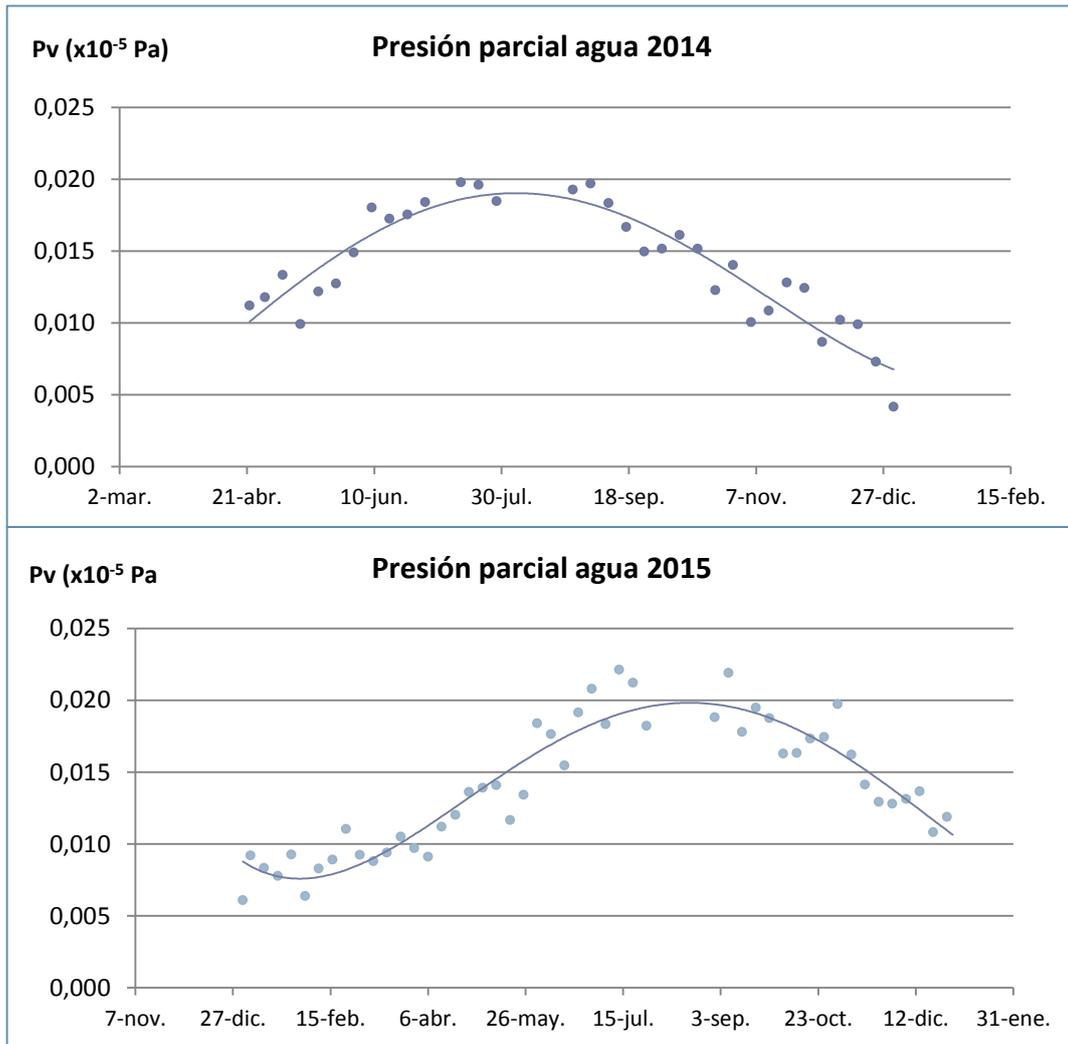


Figura 22. Evolución de la presión parcial del agua dentro de la nave en 2014 y 2015. [3]

En la *Figura 22*, se observa que existen variaciones significativas en la presión relativa del agua en la nave de Mapsa en los dos años y además dichas variaciones son similares a las de la *Figura 21*. Por ello, parece razonable tomar como variable explicativa la humedad en el interior de la nave.

### 5.2.2. Identificación y selección de variables explicativas

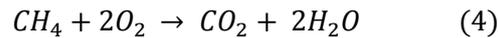
Además de la humedad ambiente, se tendrán en cuenta otras variables de estudio. Dado que la literatura existente sobre el tema que se trata es escasa, se ha optado por estudiar el proceso productivo en profundidad con el objetivo de detectar nuevas variables potenciales que sean capaces de explicar la variabilidad del gas.

El proceso de selección de variables que se consideran representativas y que pueden afectar al nivel de gas contenido en el aluminio, ha sido un proceso complejo y de múltiples etapas. Es decir, se comenzó el estudio analizando algunas variables explicativas y se fueron añadiendo nuevas para conseguir una mayor variabilidad explicada por el modelo de regresión. Asimismo, un estudio en mayor profundidad del proceso, realizado en paralelo con

el análisis de datos ha permitido detectar nuevas variables relevantes, que fueron incluidas en el estudio.

#### Aqua generada en la reacción de combustión

Inicialmente, únicamente se consideró el agua, en forma de humedad específica del aire ambiente introducida al horno. Sin embargo, durante el estudio se llegó a la conclusión de que el horno reverbero funciona mediante gas natural y que, por lo tanto, se produce una reacción de combustión dentro de él. Dicha reacción estequiométrica es:



En consecuencia, durante el proceso de combustión se genera agua, que se irá acumulando en el interior del horno.

En la reacción estequiométrica se ve que por cada mol de oxígeno consumido, se genera un mol de agua. Si 100 moles de aire seco contienen aproximadamente 21 moles de oxígeno (el 21% en volumen del aire está formado por oxígeno), por cada 100 moles de aire, se generan 21 moles de agua. En unidades másicas, equivale a decir que por cada kg de aire seco, se producen 130 gramos de agua. Si lo comparamos con la humedad específica media dentro de la nave de los dos últimos años, que es 9,21 gramos (calculada con la *Fórmula 3* y el histórico de datos), se puede decir que el agua introducida por la reacción de combustión es 14 veces superior a la introducida por el agua contenida en el aire ambiente y, en consecuencia, es importante considerarla en el análisis.

#### Las toneladas de caldo restante en el reverbero

Los tapones porosos inyectan de manera continua nitrógeno que desgasifica el aluminio. Se parte de la hipótesis de que cuanto menos caldo quede en el horno, mayor tiempo habrá pasado el aluminio en contacto con el nitrógeno y menor será su nivel de gas. Por ello, se supone que a menor toneladas de aluminio, menor porcentaje de gas.

#### Tiempo transcurrido desde el último ciclo de 15 min de agitación de los tapones

Se parte de la hipótesis de que una fuerte agitación durante los 15 min, puede generar gas al revolver el aluminio, en lugar de reducirlo. Por ello, se toma como variable el tiempo transcurrido desde que comienza el último ciclo de agitación fuerte, hasta el momento en el que se realiza la muestra de gas.

#### Duración agitación

Otra variable de estudio es la suma total de la duración de los ciclo de agitado. Se parte de la hipótesis de que a mayor tiempo de agitado, mayor cantidad de nitrógeno entra en contacto con el gas y, por lo tanto, menor cantidad de gas.

#### Temperatura de baño y de bóveda

Como se ha indicado anteriormente, la capacidad de disolución del hidrógeno en el aluminio aumenta con la temperatura. En consecuencia, se entiende que a mayores temperaturas mayores porcentajes de gas se obtendrán.

### Tiempo total transcurrido

Se parte de la suposición de que cuanto mayor sea el tiempo durante el cual el aluminio está en reposo, éste tiende a desgasificarse y, por lo tanto, tiende a reducir el nivel de gas disuelto en él.

#### **5.2.3. Obtención de datos**

Una vez seleccionadas las variables de estudio, es necesario cuantificar dichas variables para construir la base de datos que forme el conjunto de variables explicativas del modelo de regresión.

### Agua producida por la reacción de combustión

La manera de cuantificar el agua introducida al horno como consecuencia de la reacción de combustión va a ser en función del tiempo que los quemadores estén activos. Es decir, el tiempo que pasa, desde que se encienden los quemadores al iniciarse un ciclo del reverbero, cuando comienza a llenarse de aluminio, hasta el momento en el que se saca la probeta de gas. Dentro del reverbero hay dos quemadores, uno fusor y otro mantenedor. El fusor se encuentra activo principalmente durante el proceso de llenado del horno y el mantenedor tanto durante el proceso de llenado como de vaciado. Además, a ambos quemadores se les pueden regular la potencia en dos posiciones, al 100% o al 20%.

Considerando este modo de funcionamiento de los quemadores, se tomarán los 4 tiempos, ya que la cantidad de agua generada por la reacción de combustión será proporcional al tiempo que esté encendido el quemador y dependerá de la potencia a la que se encuentre.

Las variables que cuantificarán el agua generada serán:

- Qf 100%: Tiempo en min que está encendido el quemador fusor, al 100% de su potencia.
- Qf 20%: Tiempo en min que está encendido el quemador fusor, al 20% de su potencia.
- Qm 100%: Tiempo en min que está encendido el quemador mantenedor, al 100% de su potencia.
- Qm 20%: Tiempo en min que está encendido el quemador mantenedor, al 20% de su potencia.

El modo de funcionamiento de los quemadores queda registrado en el sistema productivo de Mapsa en forma de gráficos donde se puede ver la evolución temporal de los mismos (*ver Figura 23*).

Por lo tanto, de los gráficos se obtienen las horas de encendido y apagado para cada quemador y con ellos se calcula el tiempo total durante el cual han estado encendidos. Cabe destacar que en cada ciclo, cada uno de los quemadores puede encenderse y apagarse múltiples veces, con el objetivo de mantener la temperatura del horno, en valores cercanos al de consigna.

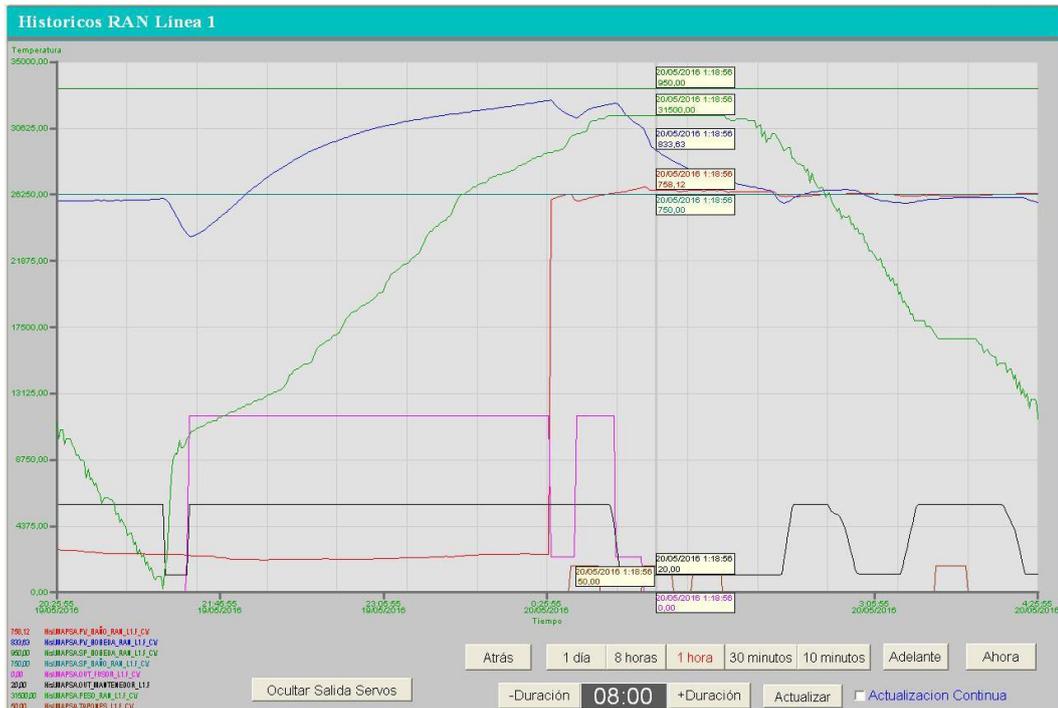


Figura 23. Registro actividad reverbero 1. En verde el peso de aluminio, en rosa el quemador fusor, en negro el quemador mantenedor, en azul la temperatura de la bóveda, en rojo la temperatura del caldo y en marrón los ciclos de agitación de los tapones porosos.

### Humedad ambiente

Los quemadores de los reverberos se alimentan del aire ambiente de la nave para aportar el oxígeno necesario para la reacción de combustión. Por ello, la humedad de la nave entrará al horno reverbero a través de los quemadores.

La humedad específica se calcula a través de la temperatura, presión y humedad relativa recogidas a través de sus respectivos sensores, de la siguiente forma [5]:

$$\omega = \frac{M_v \cdot \phi \cdot P_{sat} \cdot 1000}{M_a \cdot (P_{atm} - \phi P_{sat})} = 621.86 \cdot \frac{\phi \cdot P_{sat}}{P_{atm} - \phi \cdot P_{sat}} \quad \left( \frac{g \text{ agua}}{kg \text{ aire}} \right) \quad (5)$$

donde:

- $\phi$  : es la humedad relativa en porcentaje.
- $M_v$  : el peso molecular del vapor de agua, 18.02 kg/kmol.
- $M_a$  : el peso molecular del aire, 28.97 kg/kmol.
- $P_{sat}$  : presión de saturación del agua en bares para la temperatura en °C [6].
- $P_{atm}$  : presión atmosférica en bares.

La variable que cuantificará la humedad específica será la cantidad de agua introducida al horno, desde que comienza al ciclo hasta que se saca la muestra de gas. Para eso, se realizará una suma ponderada por la siguiente fórmula:

$$\text{Agua introducida} = \sum_{i=1}^4 Q_i \cdot \omega_{m_i} \cdot \dot{V}_i \quad (6)$$

donde:

- $Q_i$  : Tiempo que está encendido el quemador (calculado en el apartado anterior).
- $\omega_{m i}$  : Humedad específica media, durante el tiempo que el quemador ha estado encendido. Con los datos recogidos por el sensor de humedad cada 10 min y con la *Fórmula 5* se calcula la humedad específica para cada 10 min. Luego se calcula la humedad específica media teniendo en cuenta el tiempo que el quemador ha estado encendido.
- $\dot{V}_i$  : Caudal volumétrico en  $\text{Nm}^3/\text{min}$  de metano. Dichos caudales son:

Tabla 2. Caudales de gas de los quemadores del Reverbero 1. [3]

Qf 100 %	Qf 20 %	Qm 100%	Qm 20%
25,05 $\text{Nm}^3/\text{min}$	10,89 $\text{Nm}^3/\text{min}$	9,21 $\text{Nm}^3/\text{min}$	4,00 $\text{Nm}^3/\text{min}$

Para ponderar la suma se emplea el caudal de metano consumido por cada quemador, ya que el oxígeno consumido es directamente proporcional a él, y en consecuencia lo será el aire introducido al quemador y el agua en forma de humedad contenido en él.

#### Agitación del caldo y tiempo desde la última agitación

El tiempo durante el cual ha estado agitado el caldo hasta el momento de sacar la probeta de gas, y el tiempo que ha pasado desde el inicio del último ciclo de agitación fuerte hasta que se ha sacado la probeta de gas, ambos tiempos se sacan del gráfico de históricos (*Figura 23*), de igual modo que los tiempos de los quemadores.

#### Peso de la célula, temperaturas de bóveda y de baño

Tanto el peso de la célula dada en toneladas, como las temperaturas de la bóveda y del baño en grados Celsius se obtienen de un monitor situado a la salida del caldo del reverbero y se recoge en el mismo momento de sacar la muestra de gas. Dichas variables también quedan registradas en el gráfico de históricos.

#### Tiempo total transcurrido

Para contabilizar el tiempo total transcurrido desde que comienza el ciclo del reverbero y empieza a llenarse, y el momento que se saca la muestra, se toma del gráfico de históricos el momento en el que arranca el ciclo y se compara con la hora en el que se ha sacado la muestra.

### 5.2.4. Variables explicativas

Considerando cuales son los factores que más afectarían al contenido de gas en el reverbero, así como la forma en el que se cuantifican dichos valores, finalmente las variables explicativas contempladas son:

- El agua producida por la reacción de combustión, cuantificada mediante los tiempos que están encendidos los quemadores en minutos hasta que se saca la

probeta de gas. Las variables se denominarán “*Qf 100%*”, “*Qf 20%*”, “*Qm 100%*”, y “*Qm 20%*”.

- La humedad ambiente de la nave introducida a través de los quemadores hasta que se saca la probeta de gas. La variable se denominará “*Agua Introducida*”.
- El tiempo total en minutos durante el cual el caldo ha estado expuesto a una agitación fuerte hasta el momento de sacar la probeta de gas. La variable se denominará “*Agitacion caldo*”.
- Tiempo en minutos que ha pasado desde que el último ciclo de agitación fuerte ha comenzado y el momento de sacar la probeta de gas. La variable se llamará “*Tiempo agitacion*”.
- La cantidad de caldo en toneladas que queda en el horno reverbero en el momento de sacar la muestra de gas. La variable se llamará “*Peso*”.
- La temperatura en grados Celsius de la bóveda y del baño en el instante de sacar la probeta de gas. Las variables se llamarán “*Tbov*” y “*Tbano*”.
- El tiempo total transcurrido en minutos desde que arranca el ciclo y se saca la muestra de gas. La variable se llamará “*Tiempo total*”.

En total el número de variables explicativas es de 11. No obstante, el número total de variables distintas que conforman la base de datos necesario para hacer la regresión es mayor ya que a éstas variables, hay que añadir otras como:

- Probeta: número de muestra.
- Rev: reverbero del que se ha sacado la muestra, si del reverbero 1 o del reverbero 2.
- Fecha: día/mes/año en el que se ha sacado la probeta de gas.
- Hora: hora en HH:MM en el que se ha sacado la probeta de gas.
- Humedad relativa, Temperatura ambiente, Presión atmosférica y presión de saturación: necesarias para calcular la humedad específica.
- Densidad: el valor de la densidad obtenida con la báscula de densidades y con la que posteriormente se obtiene el % de gas.

En total el número de datos distintos que son registrados para cada muestra de gas es de 21.

#### **5.2.5. Variable explicada.**

Además de seleccionar de manera razonada las variables explicativas del modelo de regresión múltiple, también es muy importante asegurarse de que la medición de la variable explicada, es decir el nivel del gas expresado en porcentaje, se está realizando adecuadamente.

Considerando esto, se pueden definir dos hitos en los cuales se detectan dos factores relevantes, que afectan al nivel de gas medido y que, en consecuencia, son necesarios considerar para realizar una correcta recogida de muestras.

*Reverbero empleado*

Al comienzo del estudio, se construyó un modelo de regresión tomando muestras de gas de los dos reverberos (de la línea 1 y de la línea 2). Sin embargo, al encontrar poca variabilidad explicada, se plantea la posibilidad de que los reverberos, aun a pesar de ser iguales, trabajen de manera distinta. Por ello, se realiza un contraste de hipótesis para la varianza o ANOVA para saber si el porcentaje de gas depende del reverbero donde se funde el aluminio.

De igual modo que en un modelo de regresión, se asumen también dos hipótesis: la normalidad de los residuos con media cero, y la independencia de las muestra. Al igual que en el análisis del modelo de regresión para la calibración de la balanza de densidad se analizan los gráficos de los residuos.

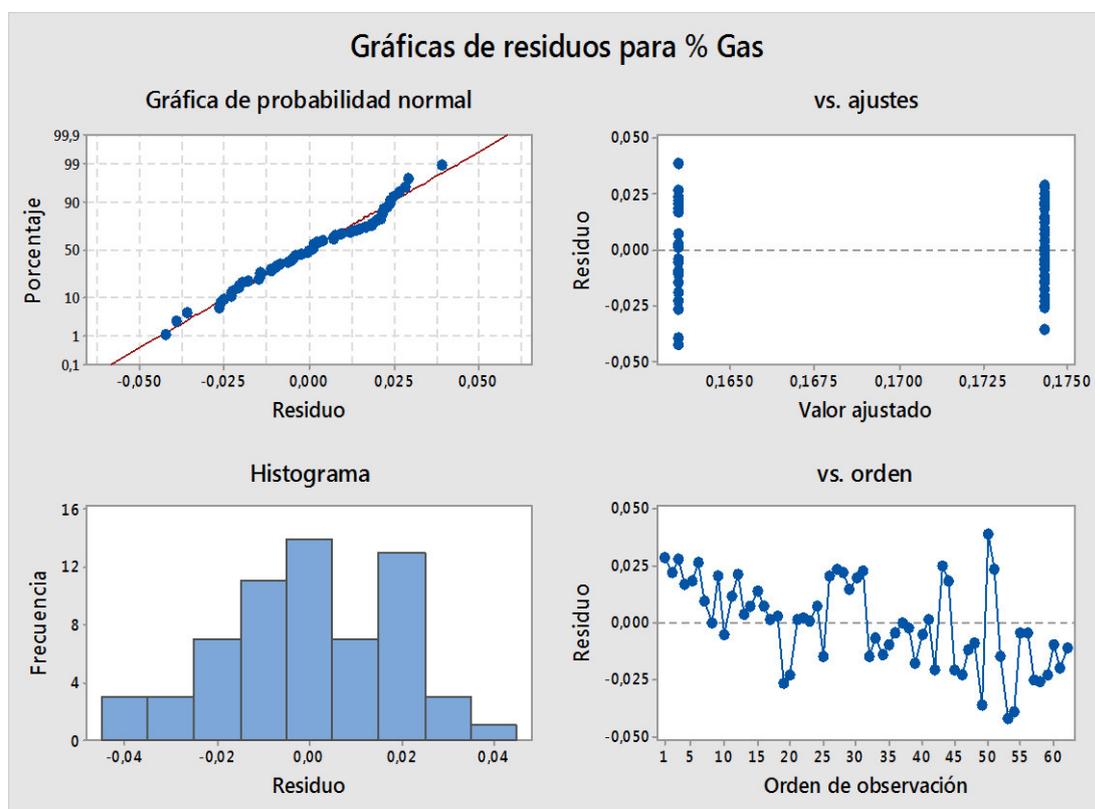


Figura 24. Gráficas de residuos para el ANOVA en función del reverbero.

Siguiendo la misma justificación que en la regresión lineal, se comprueba que se cumplen las hipótesis de normalidad e independencia de los residuos y, por lo tanto, se puede aceptar el modelo de contraste de hipótesis de la varianza.

El análisis del ANOVA unidireccional para el % Gas en función del reverbero empleado se muestra a continuación:

<b>ANOVA unidireccional: % Gas vs. Reverbbero</b>						
<u>Método</u>						
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales					
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente					
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$					
Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.						
<u>Información del factor</u>						
Factor	Niveles	Valores				
Reverbbero	2	1; 2				
<u>Análisis de Varianza</u>						
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	
Reverbbero	1	0,001723	0,001723	4,71	0,034	
Error	60	0,021958	0,000366			
Total	61	0,023682				
<u>Resumen del modelo</u>						
	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)		
	0,0191304	7,28%	5,73%	0,69%		
<u>Medias</u>						
Reverbbero	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%		
1	38	0,17430	0,01759	(0,16809; 0,18051)		
2	24	0,16348	0,02137	(0,15567; 0,17129)		
Desv.Est. agrupada = 0,0191304						

Figura 25. Modelo ANOVA unidireccional para el % Gas en función del reverbero.

Los resultados muestran que el p valor es pequeño (0,034) y menor a 0,05 y, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se puede decir que el tipo de reverbero empleado afecta al nivel de gas. De hecho, se observa que el reverbero 1 da un nivel de gas de media 17,43% (con intervalo de confianza de 16,80% a 18,05%) y que el reverbero 2 tiene un nivel medio de gas de 16,34% (con intervalo de confianza de 15,57% a 17,13%). Con ello, se comprueba que el Reverbbero 1 da aproximadamente un 1% más de gas.

Para justificar dicho comportamiento diferenciado de los reverberos se analiza a fondo sus modos de funcionamiento y se comprueba que los quemadores trabajan de manera diferente. Las presiones de combustión de los quemadores son:

Tabla 3. Presiones de combustión de los reverberos. [3]

Quemador	Reverbbero 1		Reverbbero 2	
	Fusor	Mantenedor	Fusor	Mantenedor
P. Aire (mbar)	790	880	715	860
P. Gas (mbar)	68	110	69	94

Se observa que los niveles de presión del Reverbero 1 son mayores. Considerando que los quemadores de ambos reverberos son iguales, y que el resto de parámetros también los son, se puede decir que a mayor presión, mayor será el caudal de gas en la combustión, lo que supone una mayor cantidad de agua generada y mayor será la humedad ambiente inyectada. Por lo tanto, esa diferencia en el nivel de gas puede explicarse como consecuencia de un incremento en la cantidad de agua dentro del reverbero 1.

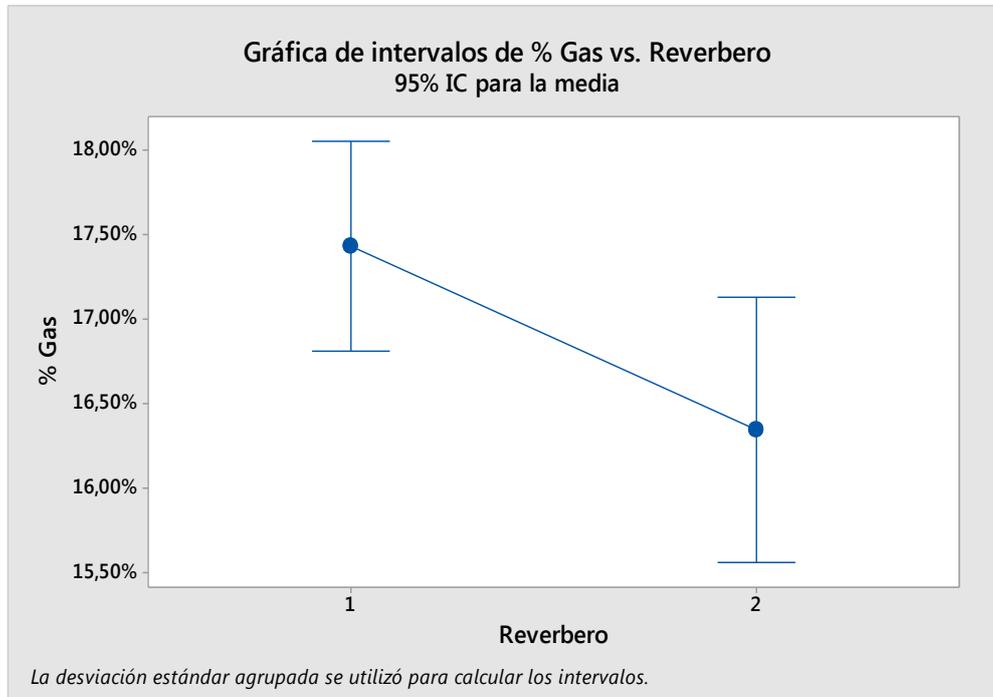


Figura 26. Gráfica de intervalos del % de Gas en función del reverbero.

Finalmente, una vez conocido que el tipo de reverbero afecta al nivel de gas, únicamente se realizará el modelo de regresión con muestras de gas obtenidas del reverbero 1.

*Instante en el que se saca la muestra de aluminio*

Más adelante en la investigación se detecta que al sacar varias muestras seguidas se obtienen valores muy diferentes en el nivel de gas. Sin embargo, se observa que los parámetros de estudio no sufren variaciones bruscas en su comportamiento y es por ello que se supone que debe de haber algún parámetro no contemplado que está distorsionando los resultados.

Se busca el origen de esa variabilidad en el modo de sacar las muestras. Por eso, se realizan todas las muestras con el cazo muy caliente y se tiene en cuenta el momento en el que se saca la muestra del reverbero. Es decir, se toman muestras en dos momentos diferentes:

- Cuando comienza a salir caldo de la canaleta situada a la salida del reverbero y comienza a llenarse la cuchara.
- Al final del llenado de la cuchara, es decir, cuando va a dejar de salir caldo por la canaleta.

Con las muestras obtenidas se realiza un ANOVA para comprobar si el momento en el que se realiza la muestra de gas, afecta al nivel de gas obtenido.

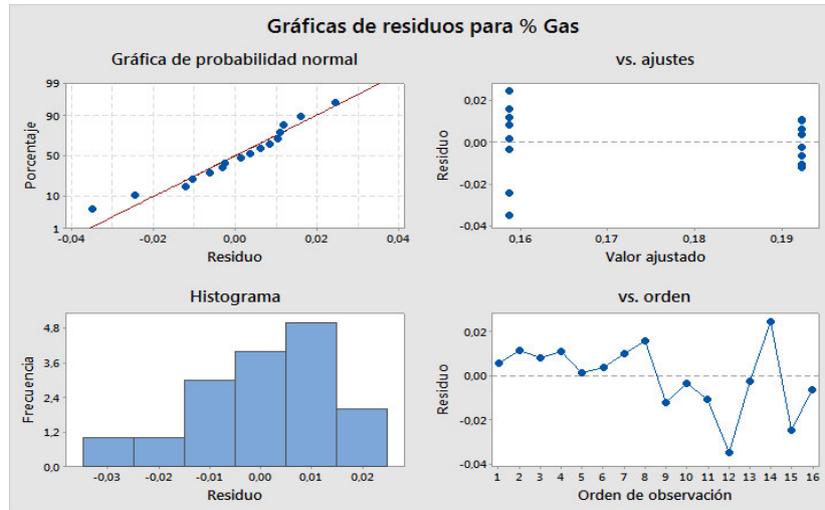


Figura 27. Gráficas de residuos para el ANOVA en función del momento.

Siguiendo la misma justificación que en el ANOVA anterior, se comprueba que se cumplen las hipótesis de normalidad e independencia de los residuos y, en consecuencia, se puede aceptar el modelo de contraste de hipótesis de la varianza como bueno.

<b>ANOVA unidireccional: % Gas vs. Momento</b>					
<u>Método</u>					
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales				
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente				
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$				
Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.					
<u>Información del factor</u>					
Factor	Niveles	Valores			
Momento	2	Comienzo chorro; Final chorro			
<u>Análisis de Varianza</u>					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Momento	1	0,004526	0,004526	18,14	0,001
Error	14	0,003494	0,000250		
Total	15	0,008021			
<u>Resumen del modelo</u>					
	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)	
	0,0157985	56,43%	53,32%	43,10%	
<u>Medias</u>					
Momento	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%	
Comienzo chorro	8	0,19231	0,00914	(0,18033; 0,20429)	
Final chorro	8	0,15867	0,02039	(0,14669; 0,17065)	
Desv.Est. agrupada = 0,0157985					

Figura 28. Modelo ANOVA unidireccional para el % Gas en función del momento.

Los resultados muestran que el p valor es pequeño (0,001) y menor que el  $\alpha$  de 0,05, correspondiente al nivel de confianza del 95%, con el que se está trabajando. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se puede decir que el momento en el que se saca la muestra a la salida del reverbero afecta al nivel de gas.

De hecho se puede observar que la diferencia es muy grande, ya que las medias son de 18,23% (IC 18,03%-20,43%) y 15,88% (IC 14,67%-17,07%), lo que supone aproximadamente un 3,5% de diferencia. Al sacar las muestras en el momento final, justo cuando se va a cerrar la salida de caldo, da un nivel de gas superior al que se sacaría en el momento inicial de la salida de caldo.

Por todo ello, se decide sacar la probeta siempre en el mismo instante. No se coge el primer momento, ya que el aluminio pasa por una canaleta desde la boca del horno hasta que cae en la cuchara, y por eso las primeras muestras del caldo tendrán una temperatura menor, ya que la canaleta estará más templada al comienzo del chorro de aluminio. Tampoco se decide coger la muestra al final, ya que la duración de llenado de las cucharas no es siempre la misma, ya que la cantidad a llenar puede variar.

Finalmente se ha establecido que la muestra se coge a los 10 segundos de comenzar a salir el caldo, ya que para ese momento ya ha pasado suficiente caldo por la canaleta como para calentarlo y obtener las muestras a una temperatura constante.

**5.2.6. Modelo regresión para el reverbero**

Con las 11 variables explicativas seleccionadas se construye el modelo de regresión. Previamente se representan las 11 variables junto con la variable explicada para ver si a priori existe una relación de correlación entre ellas. También se obtiene el valor de correlación de Pearson para cuantificar dicha correlación.

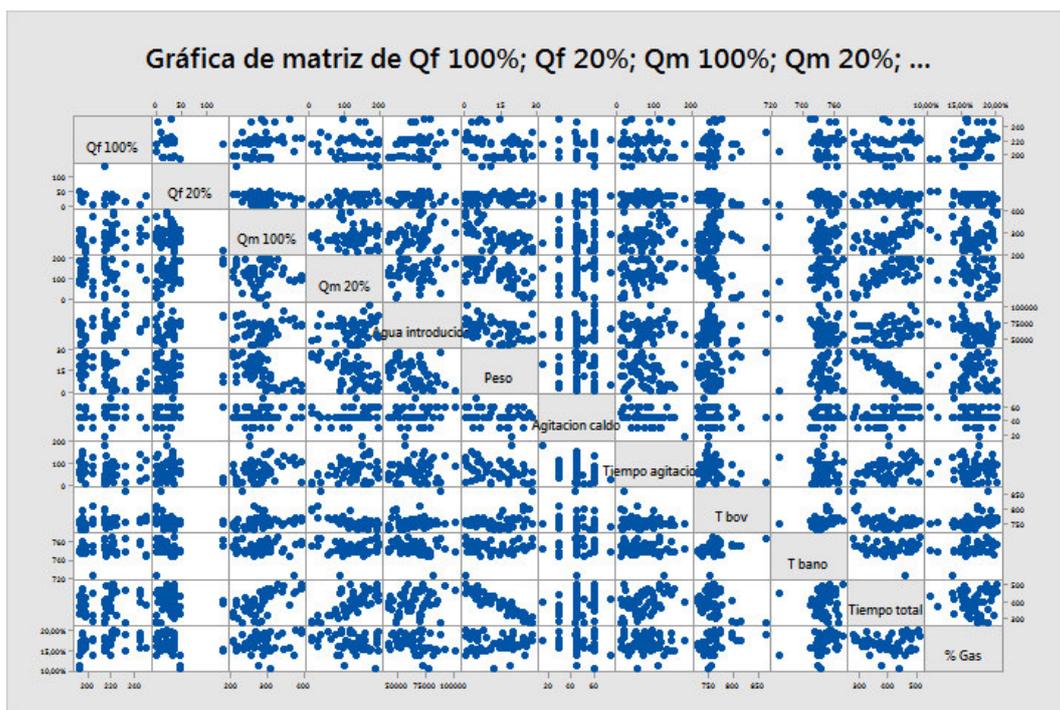


Figura 29. Gráfica de matriz de las variables del modelo de regresión del reverbero.

**Correlación:**

	Qf 100%	Qf 20%	Qm 100%	Qm 20%
Qf 20%	-0,124 0,372			
Qm 100%	0,283 0,038	-0,329 0,015		
Qm 20%	0,032 0,817	0,420 0,002	0,002 0,987	
Agua introducida	0,349 0,010	0,326 0,016	0,214 0,121	0,064 0,648
Peso	-0,337 0,013	-0,088 0,529	-0,660 0,000	-0,662 0,000
Agitacion caldo	-0,011 0,935	0,303 0,026	0,029 0,838	0,138 0,319
Tiempo agitacion	-0,003 0,982	-0,158 0,253	0,308 0,023	0,272 0,047
T bov	0,311 0,022	-0,254 0,064	0,082 0,556	-0,596 0,000
T bano	0,242 0,079	0,038 0,785	-0,030 0,831	0,033 0,811
Tiempo total	0,192 0,164	0,092 0,510	0,633 0,000	0,746 0,000
% Gas	0,340 0,012	-0,304 0,025	0,171 0,216	-0,124 0,371
	<u>Agua introducida</u>	<u>Peso</u>	<u>Agitacion caldo</u>	<u>Tiempo agitacion</u>
Peso	-0,292 0,032			
Agitacion caldo	0,191 0,167	-0,164 0,235		
Tiempo agitacion	0,114 0,412	-0,346 0,010	-0,409 0,002	
T bov	0,151 0,276	0,312 0,021	-0,126 0,363	-0,238 0,083
T bano	-0,203 0,141	0,049 0,726	0,048 0,731	-0,126 0,366
Tiempo total	0,197 0,153	-0,934 0,000	0,172 0,213	0,415 0,002
% Gas	-0,297 0,029	-0,061 0,660	-0,226 0,100	0,011 0,937
	<u>T bov</u>	<u>T bano</u>	<u>Tiempo total</u>	
T bano	0,395 0,003			
Tiempo total	-0,399 0,003	0,018 0,899		
% Gas	0,355 0,008	0,465 0,000	0,046 0,741	

Contenido de la celda: Correlación de Pearson  
Valor p

Figura 30. Correlación de Pearson para las variables del modelo de regresión.

Para que exista correlación el valor p debe ser menor de 0,05. En caso de que esto se cumpla, el coeficiente de correlación de Pearson, indica el grado de dicha correlación, siendo total cuando vale 1 (o -1 si la correlación total es negativa) y nula cuando vale 0.

Considerando lo anterior se puede decir que existe alguna correlación entre la variable explicada (% Gas) y algunas de las variables explicativas, como es el caso del *Agua introducida*, la *T bov* y *T baño* y la duración del quemador fusor a potencia del 100% y del 20%. Sin embargo, el coeficiente de Pearson no es grande (no supera al 0,5) y, por lo tanto, el nivel de regresión lineal no es muy significativo.

Así mismo existe correlación entre algunas variables explicativas. El *Tiempo total* y *Peso* tiene correlación negativa del 0,93. Dicha relación parece lógica pues, en la segunda mitad del ciclo, conforme pasa el tiempo el reverbero siempre se vacía.

También hay correlación entre el *Tiempo total* y el *Qm100%* y *Qm20%*. Parece lógico ya el quemador mantenedor va a estar encendido durante el periodo de vaciado del horno y a mayor tiempo total de la pieza, mayor tiempo será el que ha estado encendido el quemador.

Es muy importante considerar que existe correlación entre las variables explicativas ya que esto puede ocasionar un problema de multicolinealidad. Por ello se realiza un modelo de regresión múltiple con el método paso a paso, y se comprobará que las variables explicativas del modelo final no presentan correlación entre ellas.

Primero, antes de analizar el modelo, es necesario validarlo, para comprobar la normalidad e independencia de las muestras.

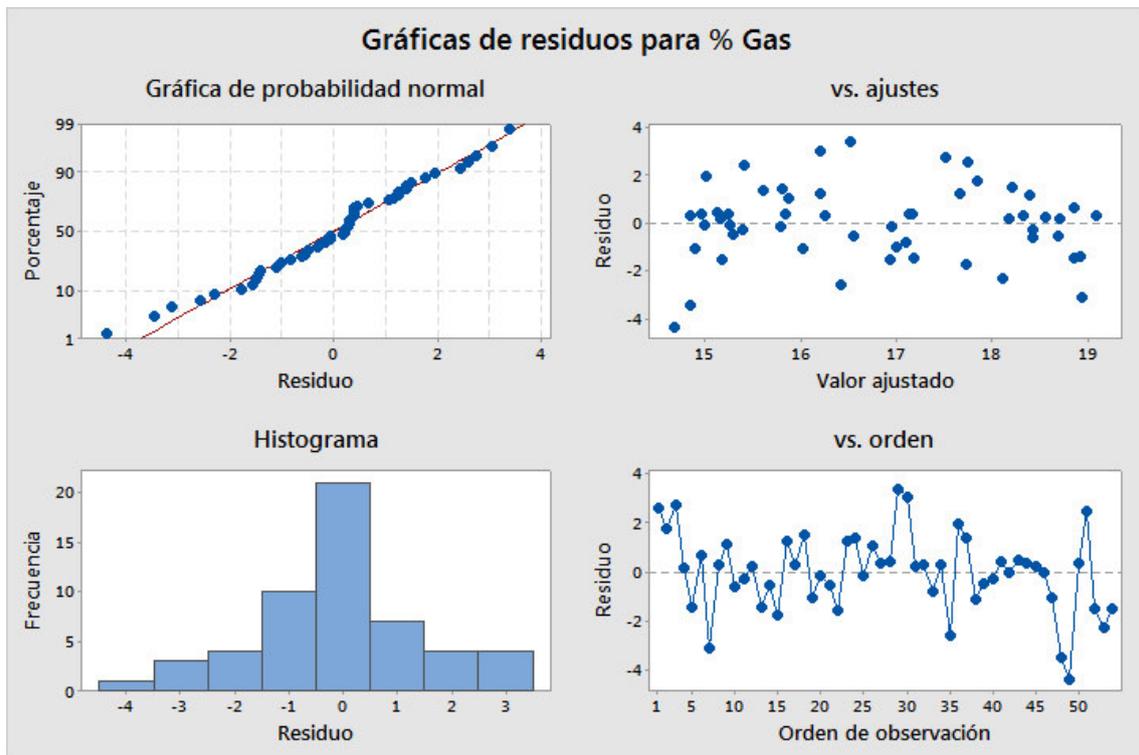


Figura 31. Gráficas de residuos para el Modelo de regresión del reverbero.

En los gráficos “vs. Ajustes” y “vs. Orden” puede verse que los residuos se distribuyen sin presentar ningún patrón entorno a la media por lo que no hay problema de heterocedasticidad. Si observamos la evolución temporal los residuos tampoco presentan patrones ni tendencias. Por tanto, se puede decir que los residuos son independientes.

En la “Gráfica probabilidad normal” se observa que los residuos siguen una distribución normal ya que los valores se ajustan mucho a la recta. Además, el “Histograma” posee forma de campana, típica de una distribución normal. En consecuencia, se asume que los datos siguen una distribución normal.

Validado el modelo, el modelo de regresión obtenido paso a paso puede tomarse como válido.

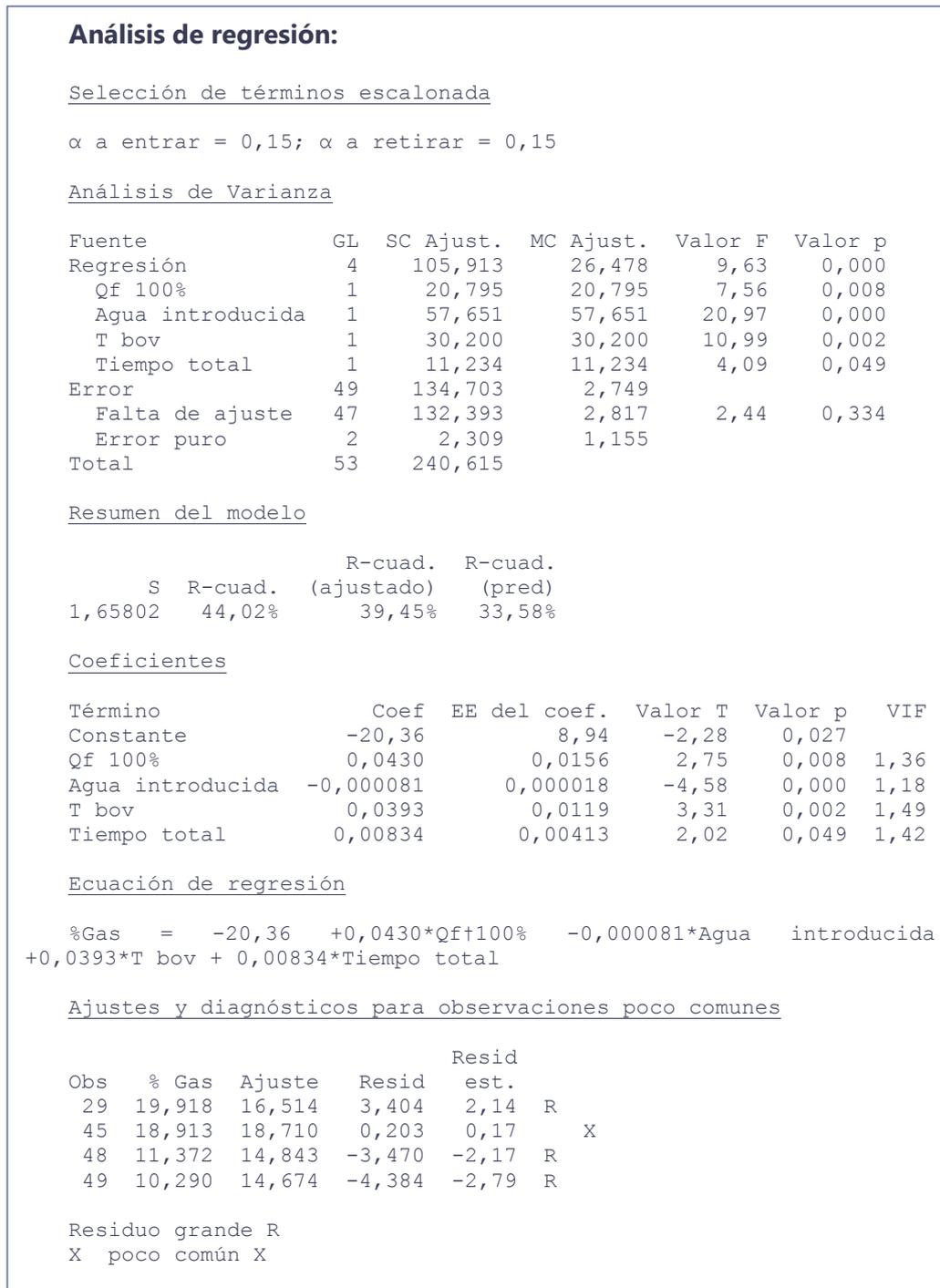


Figura 32. Modelo de regresión paso a paso para el Reverbero.

### 5.2.7. Análisis resultados regresión

El p valor de la regresión es de 0,000, por lo tanto, se puede decir que existe una relación de regresión entre la variable explicada (el %Gas) y al menos una de las variables explicativas.

Se observa que la variable explicativa que posee una mayor correlación es el *Agua introducida* ya que es la que menor p valor tiene. Sin embargo, tiene correlación negativa, es decir, cuanto mayor sea la cantidad de agua introducida menor es el nivel de gas. Este hecho contradice a la hipótesis expuesta por la bibliografía.

La siguiente variable es la *T bov*, es decir, que a mayor temperatura de la bóveda el nivel del gas aumenta. Como se ha visto, cuanto mayor sea la temperatura del caldo, la capacidad de disolución del aluminio aumenta y, en consecuencia, su nivel de gas.

Otra variable explicativa que presenta correlación es el *Qf100%*, es decir el quemador fusor, a su máxima potencia. De las cuatro combinaciones de los quemadores, la que mayor agua genera es el quemador fusor a su 100% de potencia. Por ello, cuanto mayor sea el tiempo que esté encendido, mayor será la cantidad de agua introducida y, por lo tanto, mayor será el porcentaje de gas.

Finalmente el tiempo total también presenta correlación con el porcentaje de gas. Se ve que cuanto mayor sea el tiempo que está el aluminio en el horno, mayor será su porcentaje de gas. En consecuencia, se puede decir que el nivel de gas en el interior del reverbero tiende a aumentar. Es decir las primeras cucharas llevarán un nivel de gas ligeramente inferior a las últimas cucharas.

El modelo de regresión obtenido muestra, por tanto, datos contradictorios, por lo que a pesar de que estadísticamente existe correlación entre las variables, es importante tener varias consideraciones a la hora de aceptar el modelo.

Primero, un nivel excesivo de humedad dentro del horno reverbero puede provocar la oxidación de la superficie del caldo. Dicha capa puede actuar como aislante, impidiendo que el aluminio absorba la humedad introducida al horno. Además por la parte inferior del horno se introduce el nitrógeno a través de los tapones porosos. Por ello, si el aluminio no puede absorber humedad y el nitrógeno lo desgasifica, sí que sería posible que el caldo redujera su porcentaje de gas.

Segundo, la limitación del ensayo de gas. El único método existente actualmente para la medición del gas es el que se ha empleado. Sin embargo, dicho ensayo posee un grado de incertidumbre muy grande asociado a la temperatura del caldo del aluminio ya que el porcentaje de gas depende del modo de enfriamiento de la probeta y, por lo tanto, de la temperatura del aluminio al recoger la probeta. Para el estudio del reverbero el único punto donde se pueden sacar las muestras de aluminio, es tras pasar el aluminio por la canaleta que llena las cucharas. Como se ha visto mediante el ANOVA; el momento en el que se saca la muestra de aluminio afecta al nivel de gas. Por ello siempre se han sacado las muestras a los 10 segundos de comenzar a salir el aluminio por la canaleta. Sin embargo, es posible que las variaciones de temperaturas sean muy grandes y que ello afecte al nivel de gas medido.

Tercero, podría darse el caso que durante el proceso de llenado de los reverberos, la cantidad de agua generada por los quemadoras así como el agua introducida procedente de la humedad sea tan grande que el aluminio haya alcanzado su nivel de saturación de disolución de hidrógeno ( $0,69 \text{ cm}^3/100 \text{ g Al}$ ) Si este fuera el caso no existiría relación de regresión.

Finalmente, la literatura existente indica que las principales variaciones de gas se aprecian en los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Sin embargo, las mediciones de gas empleadas en el modelo de regresión han sido recogidas en los meses de abril y mayo. Por ello, las variaciones de gas medidas no han sido demasiado grandes, y unido a la gran sensibilidad del método de medición, esto no permite medir las pequeñas variaciones recogidas durante esos meses.

Para corroborar este último punto se ha dejado preparada una hoja Excel con la programación necesaria para estudiar la relación de correlación entre el gas y la humedad ambiente, que es la variable problemática. Para ello únicamente deben introducir la humedad relativa, la temperatura ambiente y el porcentaje de gas. Con esa hoja, pueden comprobar en Mapsa si lo desean, en los meses de verano, si realmente la humedad afecta al nivel de gas en su proceso productivo.

Antes de realizar el presente estudio sobre la variabilidad del gas, en MAPSA se pensaba que una de las principales causas que generaban la variabilidad eran los reverberos basándose en unas pocas mediciones realizadas. Con lo expuesto anteriormente se puede decir que los niveles de gas en la etapa de los reverberos no poseen grandes variaciones y que la forma en la que se sacan las probetas y la incertidumbre que tiene el ensayo de medición de gas pueden ser las explicaciones que justifiquen las variaciones medidas en un principio, antes de comenzar el estudio y que se consideraron como punto de partida del mismo.

### **5.3. ESTUDIO DE GAS EN LA ETAPA DE DESESCORIADO-DESGASIFICADO**

---

La siguiente etapa del proceso en el que se estudia la variabilidad del gas es la etapa de desgasificado-desescoriado. En esta etapa, la cuchara llenada con aluminio procedente de los reverberos se coloca en una batidora FDU. En ella se bate el caldo, se añade el desescoriente y se mezcla junto con nitrógeno con el objetivo de eliminar la escoria y reducir el nivel de gas del reverbero a niveles adecuados que estén dentro de los límites del SPC.

#### **5.3.1. Factores que generan la variabilidad del gas en las batidoras**

Estudiando la etapa de desgasificado-desescoriado de las batidoras, se ha deducido que el nivel del gas a la salida de la FDU va a depender de 3 factores principalmente:

- El nivel de gas de partida, antes de batir.
- La configuración y estado de la batidora.
- La cantidad de caldo de retorno con la que vuelve la cuchara desde Moldeo.

#### *Nivel de gas antes de batir*

---

Como ya se ha visto en el análisis del modelo de regresión múltiple, la variabilidad del nivel de gas a la salida del reverbero no es tanta como en un principio se esperaba. Existe una variación de entorno al 1%, en función del reverbero empleado y de entorno al 4% en función de los parámetros estudiados en la regresión. Con ello, y considerando que en la etapa de desgasificado se desea reducir el nivel de gas a más de la mitad, se puede considerar que el nivel de gas a la salida del reverbero es relativamente estable ya que solo justifica una pequeña parte de la variabilidad del gas en el proceso global.

#### *Configuración y estado de las batidoras*

---

Como el porcentaje de gas a la salida del reverbero es relativamente constante, la configuración de las batidoras habitualmente será la misma. Salvo cambios bruscos en el nivel de gas, la configuración no se cambia.

No obstante, es necesario que el estado de las batidoras sea bueno. Por ejemplo, es muy importante que el eje esté bien centrado y limpio para asegurarse de que el vórtice necesario para mezclar el desescoriente con el aluminio se genera correctamente. Además, las ventanas del cabezal del eje deben estar limpias para facilitar que el nitrógeno y el aluminio pasen por ellas, ya que, de este modo, se rompen las burbujas de gas y facilita el desgasificado.

Por otra parte, es importante también que el canal de salida del nitrógeno a través del eje no se encuentre obstruido ya que el nitrógeno es el principal factor que provoca la disminución del nivel del gas. Para ello, basta con comprobar el caudalímetro que mide la cantidad de nitrógeno empleado.

La cantidad de aluminio en la cuchara cuando se produce el retorno del vaciador desde Moldeo es una problemática más compleja y se explica en el siguiente punto.

### 5.3.2. Caldo de retorno en cuchara

Primero, para explicar cuáles son las causas por las que los vaciadores vuelven con caldo en la cuchara tras llenar los hornos de Moldeo es necesario conocer cuál es el modo de funcionamiento de dicha sección.

La capacidad utilizada de los hornos de Moldeo es de 400 kg. Aunque su capacidad útil es de 800 o 600 kg (hay dos tipos de hornos), es necesario dejar un nivel mínimo de 200 kg para asegurarse de que no entra aire al tubo que une el horno con el molde.

El nivel de caldo en el horno se controla en función del número de ruedas que han sido moldeadas desde que se ha llenado el horno por última vez. Para ello, cada referencia de llanta posee una consigna, es decir, el número de ruedas que se pueden moldear con 400 kg. Por ejemplo, si una rueda pesa 13 kg, con 400 kg se pueden hacer 30 ruedas y ese es su valor de consigna. Por lo tanto, si se conoce el número de ruedas que puede hacer el horno con un llenado, y se contabiliza el número de ruedas moldeadas desde que se ha llenado, se conoce el número de ruedas restantes hasta que se vacíe y en consecuencia el nivel de caldo del horno.

Los vaciadores (los trabajadores encargados del llenado de los hornos) disponen de una pantalla en la que pueden ver cuáles son las máquinas que tienen asignadas (unas 10 y siempre las mismas), y de estas, cuales necesitan ser rellenadas. En la pantalla aparece el tiempo y el número de piezas restantes para que se vacíe cada horno. Sin embargo, los hornos solo se pueden abrir entre ciclo y ciclo de moldeo, es decir cuando el horno está sin presión. En consecuencia, para evitar tiempos de espera, los vaciadores pueden decidir qué horno de su lista va a llenar y por eso tienen permitido rellenar el horno antes de que se cumpla la consigna o incluso después, ya que existe un margen de seguridad de tres ruedas. En consecuencia, hasta que el vaciador llega a Moldeo, y ve qué máquina está sin presión y se puede rellenar, el vaciador no sabe la cantidad exacta de caldo que necesita.

Aunque las cucharas tienen una capacidad de 600 kg éstas deben ir llenas con 460 kg. Los 400 kg son los necesarios para llenar el horno cuando se ha cumplido toda la consigna. En este caso el llenado se realiza de manera automática mediante un lector laser que mide la altura del caldo dentro de la cuchara. Los 60 kg restantes se corresponden con el margen de seguridad de 3 ruedas pasada la consigna que tienen permitido los vaciadores y que llevan siempre como reserva en la cuchara.

Es importante considerar que una vez que los vaciadores han llenado toda la lista de hornos asignados disponen de tiempo de descanso hasta que el primer horno que han llenado, necesita ser rellenado de nuevo. Por lo tanto, cuanto más rápido realicen la ronda de llenado de los 10 hornos, más tiempo de descanso tendrán.

#### Causas que provocan el retorno de caldo en la cuchara

Si el modo de funcionamiento fuese el ideal, los vaciadores irían siempre con un nivel mínimo de caldo en la cuchara de 60 kg y máximo de 460 kg. No obstante, la cantidad de retorno puede ser mayor si se da alguna de las siguientes circunstancias:

- Si el vaciador rellena un horno antes de que se cumpla la consigna, vuelve con más de 60 kg de caldo, ya que el horno no ha consumido los 400 kg. Este hecho suele darse especialmente con operarios nuevos de ETT, los cuales por falta de experiencia y por miedo a que la máquina se quede sin caldo acuden a llenarla antes de tiempo.
- Además del llenado automático, los operarios pueden llenarlo manualmente para cuando necesiten llenar más de 400 kg. De este modo son capaces de llenar la cuchara al completo con 600 kg. De esta forma lo que consiguen es, forzando la capacidad de los hornos en Moldeo, llevándolos a su límite, reducir el número de veces que deben rellenar el horno y, por lo tanto, aumenta el tiempo libre del que disponen, ya que cuanto antes llenen los hornos, mayor será su tiempo de descanso. Por ejemplo, si el horno tiene una consigna de 30 ruedas, pero llenan el horno con caldo para 33 llantas, al llenar esas 3 ruedas de más dispondrán aproximadamente de 15 min extra antes de tener que volver a llenarlo. Sin embargo, el operario no sabe la máquina que rellenará y si le toca llenar una que no tenga capacidad para todo el caldo de la cuchara, la cantidad de caldo que llevará en el retorno será muy grande.
- También es importante considerar que los hornos son antiguos y debido a la acumulación de material sólido en el fondo del horno su capacidad real ha disminuido. Como consecuencia, el control del nivel del caldo a través de la consigna y el número de ruedas moldeadas no es totalmente efectivo. Por ello, algunos preparadores de Moldeo pueden cambiar la consigna y reducirla para evitar que se produzca el soplado de la máquina. Es decir, que entre aire en el tubo de unión entre el molde y el horno, ya que en ese caso, se produciría la parada de la moldeadora con la pérdida de disponibilidad del equipo y coste de parada que eso supondría. No obstante, dicho cambio puede ser no proporcional a la capacidad real perdida y, por lo tanto, si la consigna modificada se ha bajado más de lo debido (protegiendo en exceso la aparición del soplado), el operario acudirá a vaciar el horno quedando caldo para más ruedas en su interior. Por ejemplo, si la consigna teórica es de 30 (400kg /13 kg llanta) y la capacidad real del horno es de 361 kg, la consigna real debería ser 27. Sin embargo, si el operario la fija en 25 para asegurarse que no se queda sin caldo, el vaciador volverá con caldo sobrante en la cuchara correspondiente a 8 ruedas (3 consignada de menos, 2 por la falta de capacidad del horno y 3 del margen seguridad).

#### Problemática del % Gas consecuencia del retorno del caldo

El hecho de que los vaciadores retornen con caldo en sus cucharas desde moldeo supone una pérdida de eficiencia en el proceso de llenado de los hornos, ya que si funcionase de manera ideal, el retorno de caldo sería siempre de 60 kg (el margen de seguridad) y el proceso funcionaría de manera homogénea.

Sin embargo, el retorno del caldo supone además un problema para controlar la eficacia del proceso de desgasificado. A continuación se expone la metodología llevada a cabo para cuantificar como afecta el retorno del caldo al nivel de gas que se obtiene tras el desgasificado en la batidora.

#### **5.3.3. Relación entre la altura de retorno y el % de gas tras desgasificar**

Para estudiar cómo afecta la cantidad de caldo que llevan los vaciadores en las cucharas se realiza un ensayo en el que se mide el gas y la altura del caldo en la cuchara en 6 momentos:

- A- Se parte de la cuchara totalmente vaciada, sin nada de caldo. Por lo tanto, el nivel de gas de partida es de 0 % ya que no hay aluminio.
- B- Se llena la cuchara totalmente y se mide su porcentaje de gas antes de desgasificar y la altura del caldo dentro de la cuchara
- C- Se mide el porcentaje de gas después de desgasificar.
- D- Se mide la altura del caldo al retornar el vaciador de Moldeo y se mide el nivel de gas.
- E- Se vuelve a llenar la cuchara con caldo del reverbero. Se mide la altura y el nivel de gas.
- F- Después de desgasificar, se vuelve a medir el nivel de gas.

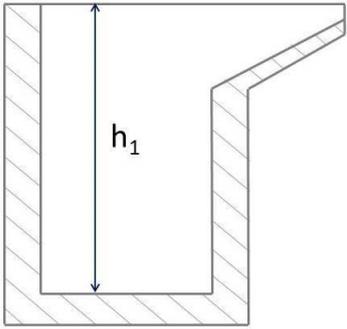
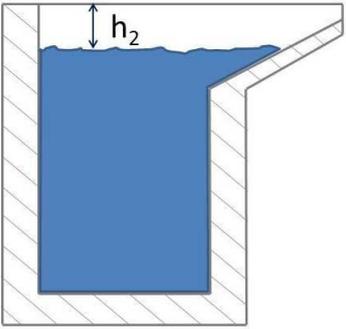
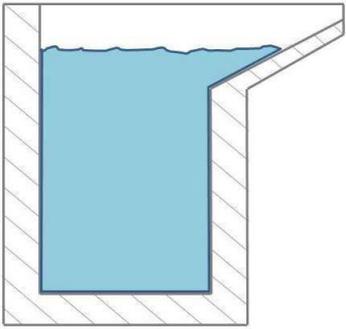
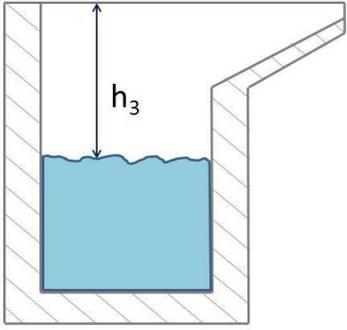
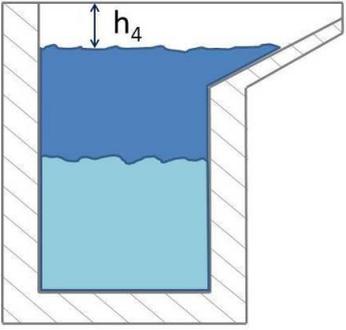
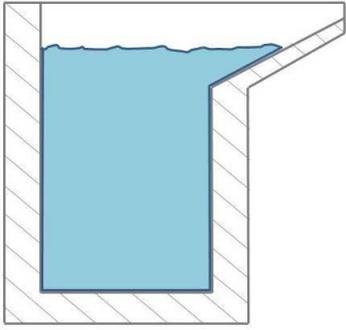
Para estudiar cómo afecta el nivel de retorno al % de gas se realiza el mismo ensayo en dos circunstancias distintas:

- Caso I: la altura de caldo de retorno es muy grande.
- Caso II: la altura de caldo de retorno es normal, y con el que se debería trabajar.

Caso I: altura de caldo de retorno muy grande

Para este ensayo los niveles de gas y las alturas medidas para cada momento han sido:

Tabla 4. Caso I: alturas de caldo y % de gas en cada momento. [3]

Momento A	Momento B	Momento C
		
$h_1 = 90 \text{ cm}$ Altura caldo = 0 cm % Gas = 0,00 %	$h_2 = 13 \text{ cm}$ Altura caldo = 77 cm % Gas = 16,15 %	$h_2 = 13 \text{ cm}$ Altura caldo = 77 cm % Gas = 6,22 %
Momento D	Momento E	Momento F
		
$h_3 = 39 \text{ cm}$ Altura caldo = 51 cm % Gas = 4,77 %	$h_4 = 18 \text{ cm}$ Altura caldo = 72 cm % Gas = 9,16 %	$h_4 = 18 \text{ cm}$ Altura caldo = 72 cm % Gas = 2,67 %

Para analizar con mayor detenimiento la evolución del gas, se representa en un gráfico junto con la altura del caldo:

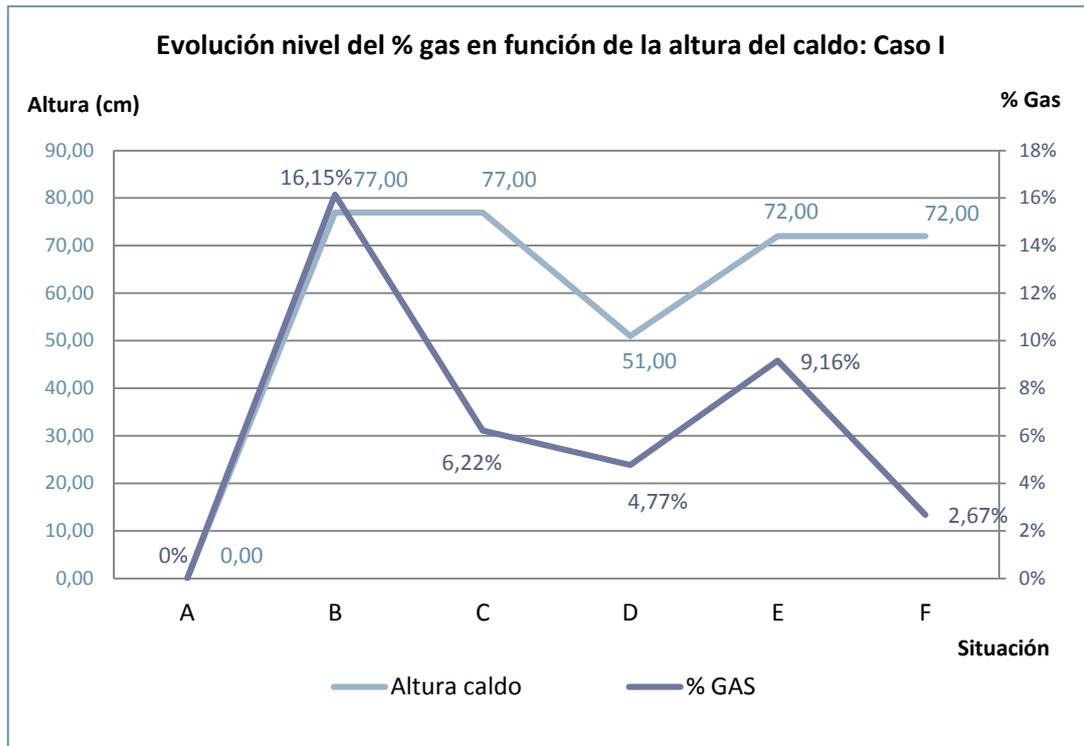


Figura 33. Evolución del % de gas en función de la altura del caldo: Caso I. [3]

Se observa que de A a B, se realiza el llenado de la cuchara hasta alcanzar 77 cm con un nivel de gas de 16,15%. A continuación entre B y C se produce el desgasificado en la batidora FDU, bajando el nivel de gas hasta 6,22%, un valor que se encuentra dentro de los límites del SPC. Después, tras vaciar en Moldeo (de C a D), se observa que el nivel de caldo ha bajado hasta 51 cm (se ha vaciado 26 cm). Asimismo, el nivel de gas ha disminuido, probablemente porque al disminuir la temperatura del aluminio, este pierde capacidad de disolución de gas.

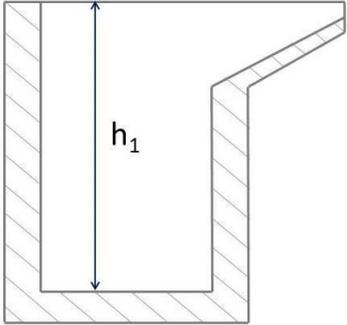
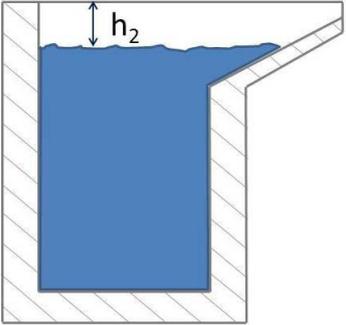
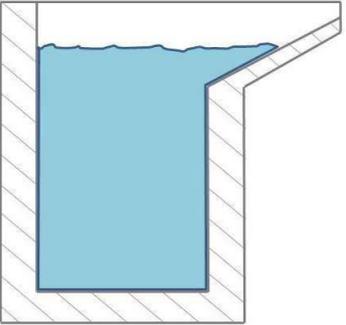
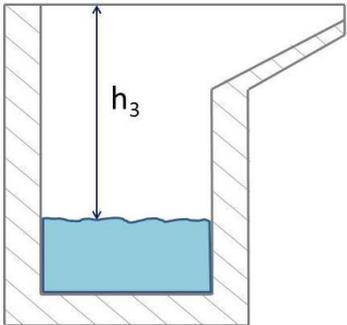
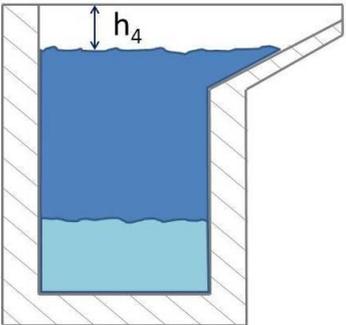
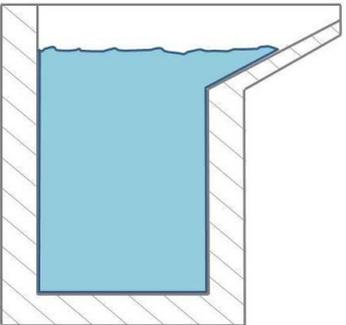
A continuación se vuelve a llenar la cuchara con aluminio del reverbero hasta 72 cm, subiendo el gas hasta el 9,16%. Se observa que el nivel de gas es mucho más bajo que en el primer llenado. Esto se debe a que en la cuchara hay una gran cantidad de caldo ya desgasificado, y que al mezclarse con el aluminio del reverbero, el gas de la mezcla resultante se encuentra entre ambos valores.

Finalmente se vuelve a desgasificar el aluminio con la cuchara FDU (de E a F) y se observa que el nivel de gas es de 2,67%, un nivel extremadamente bajo y cuyo valor se encuentra por debajo del límite inferior de control del SPC.

Caso II: altura de caldo de retorno normal

Para este ensayo los niveles de gas y las alturas medidos para cada momento distinto han sido:

Tabla 5. Caso II: alturas de caldo y % de gas en cada momento. [3]

Momento A	Momento B	Momento C
		
$h_1 = 90 \text{ cm}$ Altura caldo = 0 cm % Gas = 0,00 %	$h_2 = 12 \text{ cm}$ Altura caldo = 78 cm % Gas = 19,85 %	$h_2 = 12 \text{ cm}$ Altura caldo = 78 cm % Gas = 8,17 %
Momento D	Momento E	Momento F
		
$h_3 = 67 \text{ cm}$ Altura caldo = 23 cm % Gas = 7,60 %	$h_4 = 14 \text{ cm}$ Altura caldo = 76 cm % Gas = 17,33 %	$h_4 = 14 \text{ cm}$ Altura caldo = 76 cm % Gas = 6,37 %

Se representa gráficamente la evolución temporal:

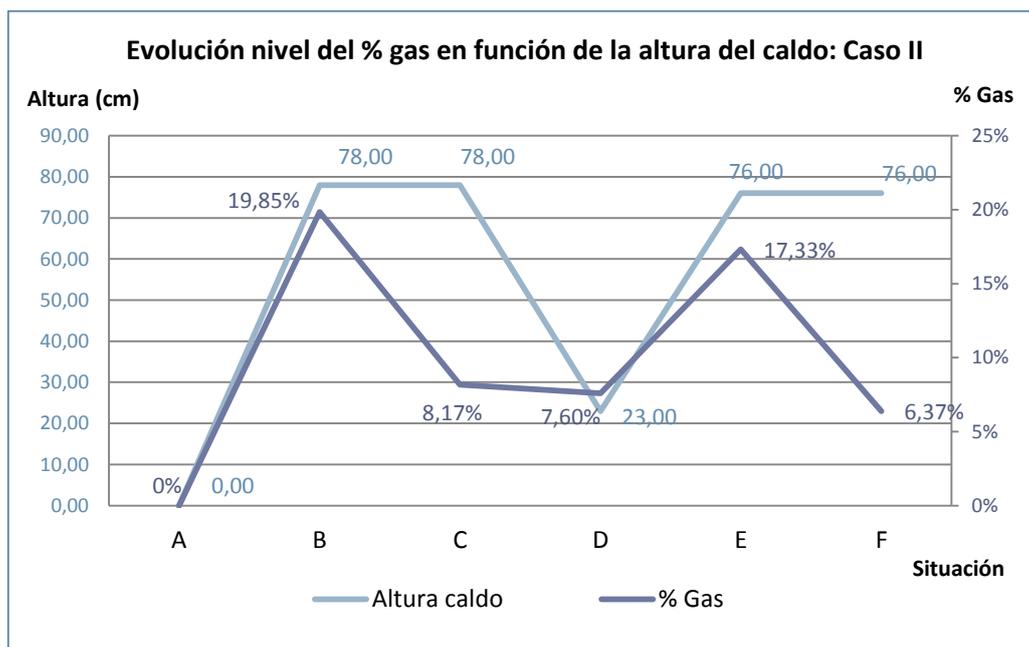


Figura 34. Evolución del % de gas en función de la altura del caldo: Caso II. [3]

Las fases son iguales a las del Caso I. Sin embargo se puede observar una clara diferencia en los niveles de gas obtenidos a partir del momento C. Se observa que tras desgasificar la primera vez, se obtiene un nivel de gas de 8,17% ligeramente superior al caso anterior dado que el nivel de gas de la colada del reverbero es también mayor (19,85%). No obstante, dicho valor se encuentra dentro de los límites del SPC. Durante el vaciado en moldeo el aluminio ha bajado el nivel de caldo en 55 cm y también se ha desgasificado.

Tras volver a llenarlo con caldo del reverbero, el nivel de gas de la mezcla es de 17,33%, ligeramente inferior al del primer llenado, dado que seguimos teniendo caldo desgasificado en la cuchara, pero su efecto es mucho menor. Finalmente al volver a desgasificar, obtenemos un nivel de gas de 6,37% que se encuentra también dentro de los límites del SPC.

#### **5.3.4. Análisis del ensayo**

Como se puede observar en los resultados obtenidos de los dos casos, el nivel de caldo de retorno desde Moldeo afecta directamente a los niveles de gas del aluminio en la etapa de desgasificado y, en consecuencia, el nivel de gas con el que se llenarán los hornos de moldeo.

Se observa que para los dos casos los niveles de gas para el primer desgasificado son adecuados. No obstante no se suele trabajar con la cuchara totalmente vaciada.

En el segundo desgasificado, cuando el nivel de caldo de retorno es bajo, se observa que el nivel de gas es correcto. Sin embargo, si se vuelve con mucho caldo en el retorno desde Moldeo, el nivel de gas baja sustancialmente, quedando fuera de los límites permitidos por el SPC. Esto se produce porque gran parte del caldo de la cuchara se desgasifica dos veces, lo que baja el nivel de gas en exceso.

Los dos casos estudiados se puede decir que son dos circunstancias opuestas. El Caso I ha sido provocado intencionadamente ya que la altura de retorno de caldo raramente suele ser tan alta. Por el contrario, el Caso II representa el modo de funcionamiento normal donde la altura de retorno es más moderada y, por lo tanto, un nivel con el que es más adecuado trabajar.

Se han escogido ambos casos para su análisis, ya que permite apreciar con mayor facilidad la importancia de trabajar con niveles de retorno de caldo lo más bajos y estables posibles.

#### **5.3.5. Medidas correctivas**

Viendo que el nivel de la altura de retorno de caldo afecta de manera directa al nivel de gas con el que trabajarán las moldeadoras, una solución para conseguir trabajar con niveles de gas adecuados, y reducir la variabilidad existente en esta fase, sería trabajar con niveles de caldo de retorno lo más bajos y homogéneos posibles. Por ello, a continuación se exponen algunas medidas correctivas para las causas que generan un retorno de caldo elevado.

#### Consigna de los hornos en moldeo

Es muy importante asegurarse de que las consignas introducidas en los equipos de moldeo sean reales, teniendo en cuenta que la capacidad de muchos hornos es menor de la útil de 400 kg, debido a la pérdida de capacidad.

Para eso sería necesario recuperar la capacidad de los hornos, limpiándolos (hecho prácticamente imposible) o cambiándolos. No obstante, en el segundo caso el coste asociado sería muy elevado.

Como consecuencia del aumento de la capacidad productiva de Mapsa, se están realizando modificaciones en la sección de Moldeo, ya que se están instalando nuevas moldeadoras y hornos. Asimismo, para reducir costes energéticos se están cambiando todos los hornos antiguos, sustituyéndolos por unos nuevos más eficientes y con capacidad útil todos ellos de 800 kg.

A pesar de que el cambio de hornos se está realizando para conseguir una mayor capacidad productiva y ahorro energético, dicho cambio supone de manera indirecta mejorar el estado de los hornos y, por lo tanto, la capacidad de fijar correctamente las consignas. Para finales del año 2016 todos los hornos antiguos serán reemplazados y de este modo el retorno provocado por una mala consigna se verá reducido notablemente a corto plazo.

#### Forma de trabajo de los vaciadores

---

La otra causa principal que provoca el retorno de caldo desde Moldeo se ha visto que es la forma en la que trabajan los vaciadores.

Primero es importante evitar que los vaciadores lleven al límite la capacidad de las máquinas para conseguir acabar una ronda de llenado de los 10 hornos en el menor tiempo posible. Ya que para ello, deben manejar mayores cantidades de caldo dentro de la cuchara y, por lo tanto, las cantidades de retorno del caldo serán mayores.

Asimismo, deberían intentar acudir a cada máquina en el momento que se cumple la consigna y evitar ir antes o después.

Para concienciar de la importancia de trabajar adecuadamente y cómo deben hacerlo se realizará un curso de formación para los vaciadores. (Adjuntado en el *Anexo 1*). En él, primero se informará de la importancia de trabajar con niveles adecuados de gas para conseguir que el número de rechazos por defectos mecánicos o estéticos sea el menor posible. Para ello se les mostrará el ejemplo ilustrado en la *Tabla 1*.

A continuación se mostrarán los dos casos anteriormente expuestos, para mostrarles la importancia que tiene el trabajar con niveles de caldo de retorno lo más bajos y homogéneos posibles ya que dicho parámetro afecta directamente al nivel de gas con el que trabajarán las moldeadoras.

También se insistirá en la importancia de mantener en buen estado las batidoras FDU de desgasificado para conseguir que trabajen correctamente.

Finalmente se les mostrará una rueda con acabado diamantado donde podrán ver los defectos generados por el gas y por la escoria, que se dan cuando la limpieza y el desgasificado de las batidoras no se realizan correctamente.

## 5.4. ESTUDIO DE GAS EN LA ETAPA DE MOLDEO

---

La última etapa en el que se estudia la variabilidad del gas en el aluminio, es la sección de Moldeo. En concreto se estudia el nivel de gas dentro de los hornos mantenedores de caldo que posee cada moldeadora.

### 5.4.1. Evolución del punto de rocío

Moldeo es la etapa donde la variabilidad del gas está más controlada al inicio del presente estudio.

El método de moldeo a baja presión, implica aumentar la presión del interior del horno hasta 1 bar. Para ello se emplea aire ambiente, el cual contiene humedad. Por ello, al igual que ocurre con los quemadores de los reverberos, se introduce agua junto con el aire al interior de los hornos.

El parámetro fundamental que afecta al nivel de gas es el punto de rocío. El punto de rocío es la temperatura a partir de la cual la humedad ambiente contenida en el aire condensa. Mapsa ha trabajado con distintos puntos de rocío hasta encontrar cuál es el punto óptimo. Dicha evolución se detalla a continuación.

#### Primera etapa

---

Inicialmente para aumentar la presión en el interior del horno se introducía aire ambiente directamente al horno. Es decir, se introducía aire húmedo (aire seco junto con humedad). Aunque mediante la compresión del aire, este pierde algo de agua, al aire introducido al horno no se le aplicaba ningún secado adicional. Con esta instalación de inyección de aire, se trabajaba con puntos de rocío entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $+5^{\circ}\text{C}$ .

Con estos puntos de rocío, los valores de gas de las cucharas tras pasar por las desgasificadoras FDUs, eran entorno al 4%, ya que dentro del horno, el caldo se gasificaba hasta niveles del 12%. Esto sucede ya que el aire empleado contiene mucha agua, lo que favorece la oxidación y la liberación del hidrógeno que será absorbido por el aluminio.

#### Segunda etapa

---

Para evitar el problema anterior, se modificó la instalación. Se instalaron dos equipos secadores (de adsorción y refrigeración), con lo que se eliminaba la mayor parte del agua, introduciendo al horno aire seco. De esta forma se trabajaba con puntos de rocío de  $-55^{\circ}\text{C}$  y  $-45^{\circ}\text{C}$ .

Con este modo de funcionamiento, se seguía yendo con un 4% de gas en las cucharas. Sin embargo, en este caso el caldo se desgasificaba dentro del horno, llegando a valores del 0% de gas. Dado que el aire introducido era prácticamente seco, ausente de humedad, el aluminio cedía su hidrógeno disuelto al aire para tratar de compensar la diferencia.

Por ello se cambiaron los valores de gas tras el desgasificado, pasando a valores del 7,5%, valor con los que también se trabaja actualmente. No obstante, el nivel de gas dentro del horno seguía bajando hasta el 1,5%.

Tercera etapa

Actualmente se trabajan con puntos de rocío entre  $-30^{\circ}\text{C}$  y  $-20^{\circ}\text{C}$ . El nivel de gas de las cucharas tras su desgasificado es de 7,5% de media. Con ese punto de rocío, y ese nivel de gas en la cuchara, se ha conseguido que dentro del horno los niveles de gas se bajen entorno al 1%.

Por todo ello se puede considerar que el nivel de gas en la sección de moldeo está muy controlado ya que han conseguido obtener mucha estabilidad dentro de los hornos mantenedores.

No obstante, a continuación se comprobará como varía realmente el nivel de gas dentro del horno, estudiando sus niveles cuando se encuentren llenos y vacíos.

**5.4.2. Nivel de gas dentro del horno**

Mediante un análisis de varianza ANOVA se va a comprobar si realmente el nivel de gas en el interior de los hornos disminuye. Para ello se han tomado muestras de gas en dos momentos diferentes:

- Justo después de llenar, tras haberse moldeado 2 o 3 llantas para dejar que el caldo se estabilice.
- Cuando está prácticamente vacío tras cumplir la consigna y el vaciador lo va a rellenar.

En total se han sacado cerca de 200 probetas de medición de gas de 6 máquinas diferentes. Con todas las muestras se realiza un análisis de varianza y como en los casos anteriores, primero se comprueba que se cumplen las suposiciones de normalidad e independencia de los residuos:

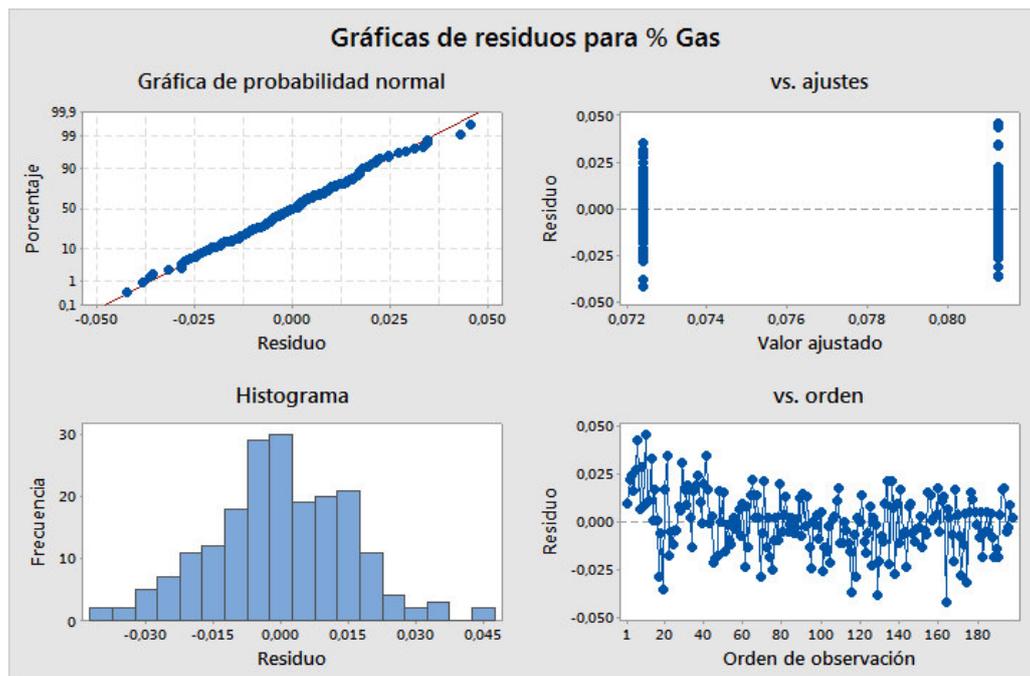


Figura 35. Gráficas de residuos para el ANOVA en función del nivel del horno.

Observando el histograma y la gráfica de probabilidad normal se puede decir que los residuos siguen una distribución normal, ya que se ajustan mucho a la recta de probabilidad normal y el histograma muestra una forma de campana normal. Por otro lado, los residuos se distribuyen de manera aleatoria, sin seguir ninguna tendencia. Por todo ello, se puede decir que se cumplen las dos hipótesis de normalidad e independencia de los datos.

El análisis ANOVA resultante, es el que se muestra a continuación:

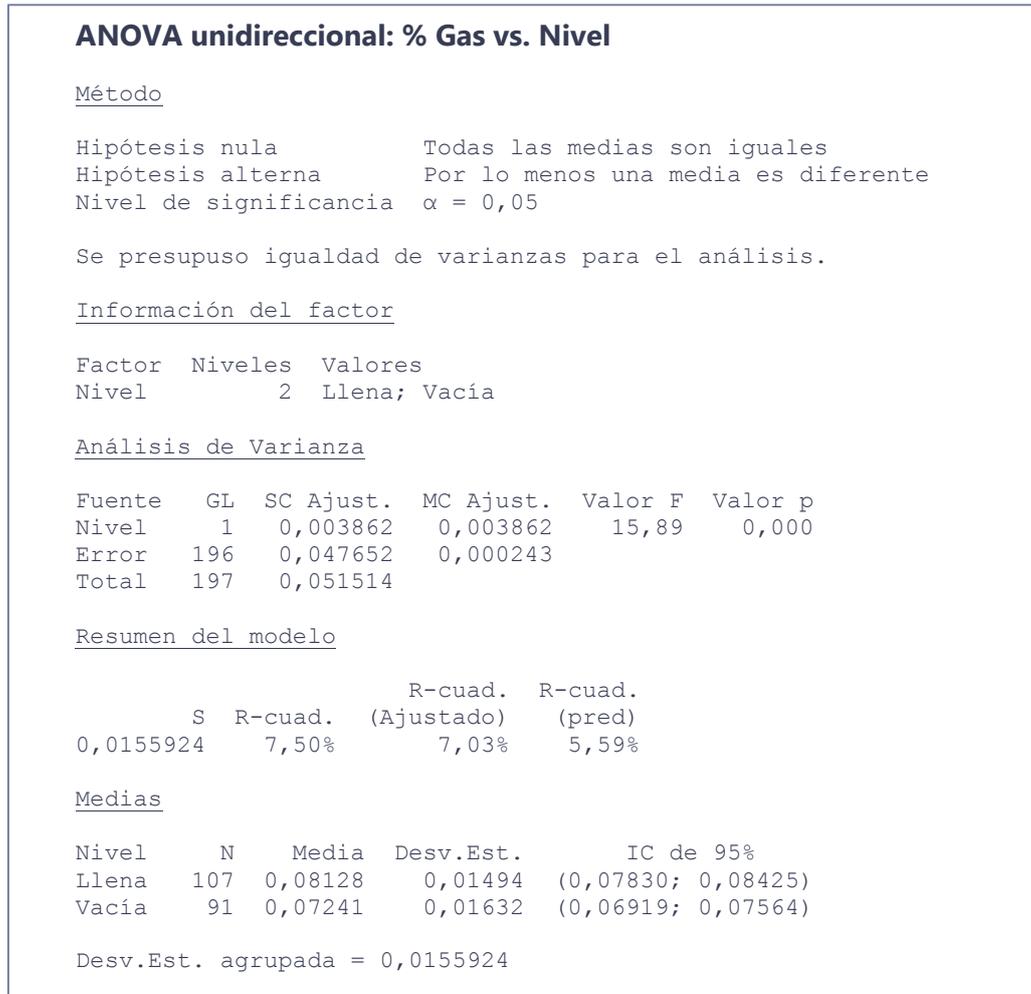


Figura 36. Modelo ANOVA unidireccional para el % Gas en función del momento.

El p valor es muy pequeño, casi 0, y menor que 0,05, por lo que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se puede decir que el nivel de gas va a depender del nivel de caldo que hay dentro del horno mantenedor.

De hecho se puede observar que el porcentaje de gas medio, cuando el horno está lleno es de 8,13% (con un IC de 7,83% a 8,42%). Cuando el horno se encuentra vacío el nivel de gas medio es de 7,24 % (con un IC de 6,92% a 7,56%). Es decir, el caldo de aluminio dentro del horno tiende a desgasificarse casi un 1 %.

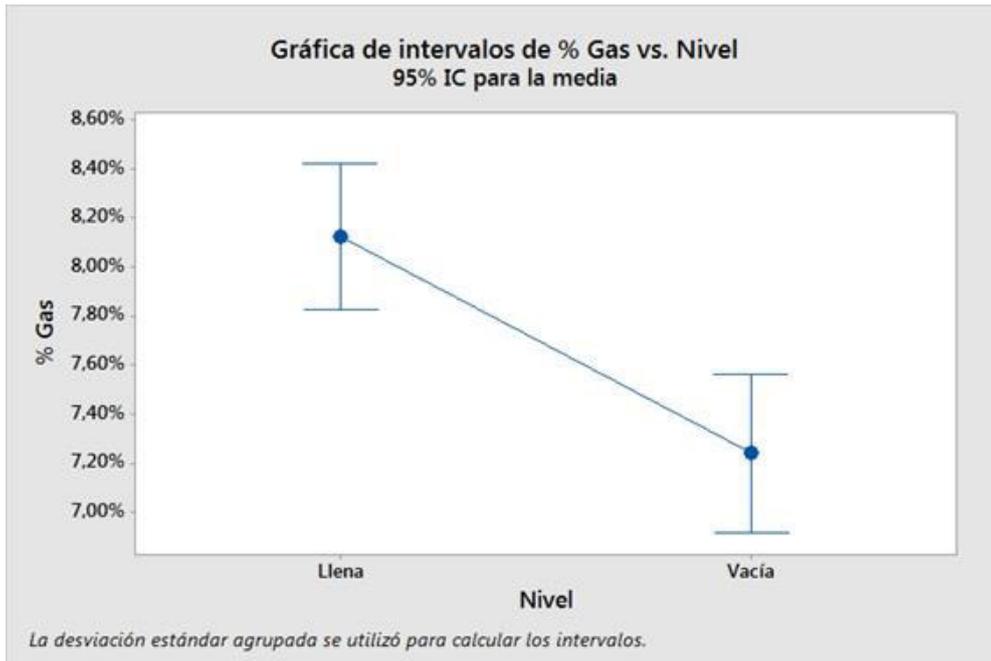


Figura 37. Gráfica de intervalos del % de Gas en función del nivel del caldo.

El SPC fija los niveles de gas adecuados a la salida de la etapa de desgasificado. Considerando además que el caldo se desgasifica levemente desde su salida de la batidora hasta que se llena el horno, el valor de 8,13% en lleno es un valor ligeramente superior al deseado. Por lo tanto, durante el periodo que se han tomado las muestras de gas, en la etapa de desgasificado, no se ha bajado el nivel de gas lo suficiente. No obstante, la diferencia no es demasiado relevante considerando que la variabilidad del gas a lo largo del proceso es muy grande y además dicho valor se encuentra dentro de los límites permitidos por el SPC.

Es muy importante considerar que el nivel de gas dependerá del nivel de caldo en el horno. Si se realiza un control de gas desde moldeo es importante saber que si la muestra se ha cogido cuando el horno está vacío, el gas medido será menor al que obtendríamos en la etapa de desgasificado y con el que controla el SPC. Es decir, si por ejemplo, en vacío obtenemos un valor de 7,5%, el nivel de gas no se encuentra en su punto ideal, ya que, para obtener dicho valor con el horno vacío, quiere decir que el nivel de gas en el llenado ha sido superior al ideal.

Por lo tanto, sabiendo que la diferencia entre lleno y vacío es aproximadamente un 1%, se puede estimar tanto con el horno en vacío como con el horno lleno si se está trabajando con niveles adecuados de gas.

## **6. CONCLUSIONES E IMPACTO DEL ESTUDIO PARA LA EMPRESA**

El nivel de gas contenido en el aluminio es uno de principales parámetros que afectan a la producción de llantas por moldeo a baja presión en el proceso productivo de la empresa Mapsa. Por ello, es muy importante trabajar con niveles adecuados de gas para conseguir que el nivel de rechazos asociados a este parámetro sea el menor posible. Además, los defectos asociados a niveles inadecuados de gas, aunque se generan al principio del proceso productivo, no aparecen fundamentalmente hasta la última etapa del proceso productivo, en las llantas con acabado diamantado y con acabado mate, por lo que los costes económicos asociados al rechazo de la llanta son considerables ya que la rueda está terminada y estaría lista para su venta si no presentase dichos defectos. Además, las llantas con esos acabados estéticos ya suponen un tercio de las ventas y está aumentando su demanda, por lo tanto, los rechazos están aumentado y con ello las pérdidas económicas.

Sin embargo, el nivel de gas es un parámetro difícil de controlar ya que presenta mucha variabilidad a lo largo del proceso. Por ello, se ha realizado este estudio con el objetivo de analizar la variabilidad del gas en distintas etapas del proceso, identificando en cada una de ellas cuáles son las causas que la genera y ofrecer en el caso que sea posible medidas correctivas que permitan estabilizar dicho parámetro.

El estudio de la variabilidad del gas ha sido un proceso complejo por varias razones. Primeramente, el método de medición de gas es un ensayo costoso, ya que se requiere de mucho tiempo (unos 10 min) para obtener un único dato de gas. Además, por la complejidad del método, la precisión con la que se obtienen las mediciones de gas puede ser insuficiente para estudiar la variabilidad del nivel de gas en etapas del proceso donde la variabilidad es pequeña.

Por otro lado, la fabricación de componentes de aluminio para automoción es un mercado joven y en crecimiento, y por ello, el campo de investigación de estos procesos, y en consecuencia la literatura existente sobre el tema, es escasa.

Por todo ello, el proceso de identificación de variables o causas que afecten al nivel de gas ha sido un proceso arduo. El punto de partida del estudio se ha basado en la identificación de algunos factores que afectan al nivel de gas, que Mapsa a través de su experiencia ha adquirido. Sin embargo, aparte de contrastar las hipótesis de Mapsa y la literatura, y por considerarlas insuficientes, se ha realizado un estudio en mayor profundidad del proceso para identificar y valorar otras fuentes de variabilidad que pudiesen afectar al parámetro estudiado. Este proceso no se ha realizado en una única etapa, sino que ha sido un proceso laborioso que se ha llevado a cabo a lo largo de todo el estudio.

El trabajo de investigación no ha sido un mero ejercicio estadístico de análisis de datos. El análisis del problema exige una aproximación multidisciplinar donde se han aplicado conocimientos de varios campos como la metalurgia, la Ingeniería térmica, la psicrometría, la química, las reacciones de combustión, la gestión de un proceso productivo, las técnicas estadísticas, las metodologías de análisis de datos etc.

Además, una vez seleccionados razonadamente cuáles son los factores que pueden afectar al nivel de gas ha sido necesario medir dichos factores para tratar de definir el modo en el que afectan al gas del aluminio. Para ello ha sido necesario construir una base de datos para la que

primero ha sido preciso definir la forma en la que se iba a cuantificar las variables que explican la variabilidad en el nivel de gas. A continuación ha sido necesario escoger la metodología de análisis de datos más adecuada para estudiar el problema. Para ello se han empleado modelos de regresión lineal simple, modelo de regresión lineal múltiple por el método paso a paso, modelos de regresión no lineal y contraste de hipótesis para la varianza.

Aun considerando la complejidad del proceso, se han obtenido resultados satisfactorios en las tres etapas estudiadas (Fundición en reverberos, Etapa de desgasificado-desescoriado y Moldeo).

Los resultados obtenidos en la etapa de fundición en el reverbero no han sido los esperados. A priori, en Mapsa se pensaba que en esta etapa existía mucha variabilidad causada por la humedad ambiente en la nave. Sin embargo los resultados obtenidos muestran que, aunque sí que varía el nivel de gas en el reverbero, la variación no es tan significativa como se esperaba. Además que dicha variación sea provocada por la humedad ambiente no ha sido demostrada. En esta etapa sin embargo se han descubierto dos hitos, desconocidos por la empresa hasta el momento. Por un lado que el reverbero 1 aporta de media un 1% más de gas, y que el momento en el que se saca la muestra de gas, a su salida por la canaleta afecta mucho al nivel medido. De hecho gran parte de la variabilidad que se creía que generaba la humedad, es probable que fuese generada por este segundo hito. El conocimiento de ambos hechos va a evitar que se tomen decisiones erróneas en base a mediciones defectuosas.

En la tercera etapa del proceso (Moldeo), se ha comprobado que los niveles de gas son muy estables y que, por lo tanto, la variabilidad en dicha etapa es poco significativa. Sin embargo, sí que se ha comprobado que el nivel de gas dentro de los hornos baja entorno al 1% conforme va bajando el nivel del caldo. No obstante, si el nivel del gas en el llenado de los hornos es adecuado, el nivel de gas del horno en vacío también lo será.

Finalmente la segunda etapa, la de desgasificado-desescoriado, es la que mayor variabilidad aporta al proceso. Se ha detectado que el estado de los hornos de moldeo, así como el modo en el que trabajan los operarios (los vaciadores), afectan de manera directa a la eficiencia del proceso de desgasificado.

### Impacto para la empresa

Con la investigación se ha generado una importante base de datos y conocimiento sobre las primeras etapas del proceso productivo de Mapsa que hasta este momento no disponían.

Sin embargo, aparte de aumentar su conocimiento sobre el proceso, el estudio ha tenido repercusiones directas en la forma de trabajar de la empresa.

Primero se han descubierto fuentes de variabilidad hasta el momento desconocidas, como que el reverbero empleado influye en el nivel de gas, así como, que a la hora de coger una muestra de gas en el reverbero, hay que considerar el momento en el que se hace.

También se han hecho recomendaciones para corregir las causas que generan niveles inadecuados de gas. Para ello se ha implantado un procedimiento para la mejora de la estabilidad del gas en la etapa de desgasificado-desescoriado, que es la que mayores

variaciones en el nivel de gas tiene y, por tanto, de la que más va a depender que aparezcan fallos en las llantas como consecuencia del gas.

Dicho procedimiento consiste en un curso de formación para los vaciadores donde se les indica la importancia de trabajar con niveles de gas adecuados para reducir el nivel de defectivo. En el mismo curso se les muestra también la consecuencia que tiene el realizar el trabajo de llenado de los hornos de manera inadecuada (con niveles de caldo inadecuados). Y por último se les muestra la forma en la que deben realizar el trabajo de limpieza y mantenimientos de las cucharas y batidoras. Todo ello para conseguir que los niveles de gas sean estables y adecuados al proceso productivo.

La implantación del curso tiene, por lo tanto, consecuencias directas en el nivel de defectivo, ya que se verá reducido. De este modo, se conseguirá mejorar la productividad y eficiencia del proceso, consiguiendo reducir las pérdidas económicas asociadas a las ruedas defectuosas generadas por trabajar con niveles de gas inadecuados.

En cuanto al estudio de la variable humedad en la etapa de los reverberos, se ha dejado todo el material necesario a disposición de la empresa para seguir con el estudio. La literatura indica que los efectos de la humedad son más relevantes en los meses de verano. Al no estar presente en la empresa en esos meses se deja una guía y los recursos necesarios para continuar con el estudio si Mapsa lo considera oportuno.

## **7. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista de la planta de Mapsa en Orkoien.....	11
Figura 2. Cartera de clientes de Mapsa. ....	12
Figura 3. Ejemplo de llantas fabricadas en la planta de Mapsa. ....	12
Figura 4. Esquema del proceso productivo para la fabricación de llantas en Mapsa. ....	14
Figura 5. Lay Out de la nave de Fusión .....	16
Figura 6. Horno reverbero (a la izquierda) y torre fusora (a la derecha). ....	16
Figura 7. Etapa desgasificado-desescoriado.....	18
Figura 8. Molde típico para la fabricación de llantas en LPDC. [1] .....	19
Figura 9. Nave de Moldeo. Se aprecian los hornos y las moldeadoras sobre ellos.....	20
Figura 10. Máquina de rayos X. ....	20
Figura 11. Robot de la célula de desmazarotado colocando una llanta en la máquina de taladro (izquierda) y la mazarota de la llanta (derecha). ....	21
Figura 12. Célula de mecanizado automática.....	22
Figura 13. Línea automática de pintado pintura. ....	23
Figura 14. Ejemplo macroporosidad o rechupe y micrografía de rechupe. [2].....	26
Figura 15. Solubilidad de Hidrógeno en el aluminio en función de la temperatura. [1] .....	27
Figura 16. Ejemplo microporosidad y micrografía de micro-poros. [2].....	28
Figura 17. Equipo de vacío y probeta de gas respectivamente. ....	33
Figura 18. Gráfica de residuos para el modelo de regresión de la balanza.....	35
Figura 19. Recta de regresión para la calibración de la báscula de densidades.....	35
Figura 20. Modelo de regresión para la calibración de la balanza. ....	36
Figura 21. Variación de la presión parcial del agua ambiente en una fundición de ruedas de América del Norte. [1].....	37
Figura 22. Evolución de la presión parcial del agua dentro de la nave en 2014 y 2015. [3] 38	
Figura 23. Registro actividad reverbero 1. ....	41
Figura 24. Gráficas de residuos para el ANOVA en función del reverbero.....	44
Figura 25. Modelo ANOVA unidireccional para el % Gas en función del reverbero. ....	45
Figura 26. Gráfica de intervalos del % de Gas en función del reverbero. ....	46
Figura 27. Gráficas de residuos para el ANOVA en función del momento.....	47
Figura 28. Modelo ANOVA unidireccional para el % Gas en función del momento.....	47
Figura 29. Gráfica de matriz de las variables del modelo de regresión del reverbero.....	48
Figura 30. Correlación de Pearson para las variables del modelo de regresión.....	49
Figura 31. Gráficas de residuos para el Modelo de regresión del reverbero. ....	50
Figura 32. Modelo de regresión paso a paso para el Reverbero.....	51
Figura 33. Evolución del % de gas en función de la altura del caldo: Caso I. [3] .....	58
Figura 34. Evolución del % de gas en función de la altura del caldo: Caso II. [3] .....	59
Figura 35. Gráficas de residuos para el ANOVA en función del nivel del horno.....	63
Figura 36. Modelo ANOVA unidireccional para el % Gas en función del momento.....	64
Figura 37. Gráfica de intervalos del % de Gas en función del nivel del caldo. ....	65

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Histórico de defectivo de llantas. [3] .....	30
Tabla 2. Caudales de gas de los quemadores del Reverbero 1. [3] .....	42
Tabla 3. Presiones de combustión de los reverberos. [3].....	45
Tabla 4. Caso I: alturas de caldo y % de gas en cada momento. [3].....	57
Tabla 5. Caso II: alturas de caldo y % de gas en cada momento. [3].....	59

## **8. REFERENCIAS**

- 1] B. Zhang, S.L. Cockcroft, D.M. Maijer, J.D. Zhu, and A.B. Phillion, "Casting Defects in Low-Pressure," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, no. November, pp. 36-43, 2005.
- 2] Elaboración propia, *Laboratorio de Metalurgia de Mapsa.S.Coop.L.*, Orkoien, 2016.
- 3] Elaboración propia con herramientas de Microsoft Excel y Word.
- 4] Elaboración propia, *Todos los análisis de datos (ANOVA, REGRESIÓN) se han realizado con Minitab17.*
- 5] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro;, "Fundamentos de Termodinámica Técnica," in *De las fórmulas 12.43 y 12.44*, 4ª edición ed., Reverte, 2004, p. 655.
- 6] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, "Fundamentos de Termodinámica Técnica," in *Tabla A.2. Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas*, 2ª edición ed., Reverté, 2004, pp. 810-811.

## 9. ANÉXOS

## 9.1. ANEXO 1: PRESENTACIÓN CURSO DE FORMACIÓN VACIADORES



# CURSO FORMACIÓN VACIADORES

MAPSA. S. COOP.

ORKOEN | JUNIO 2016

**MAPSA** 

# ÍNDICE

---



1. FUNCIONES DE LAS BATIDORAS FDUs.
2. IMPORTANCIA DESESCORIADO.
3. IMPORTANCIA DESGASIFICADO.
4. MÉTODO DE TRABAJO.



# 1. FUNCIONES DE LAS BATIDORAS FDU.



## EFFECTO LIMPIEZA

- Función: evitar y eliminar la escoria.
- Etapas:
  - Arranque: genera un vortex (30seg) para mezclar bien el aluminio y el desescoriente.
  - Mezclado sin Vortex.
  - Últimos 30 seg se introduce la paleta para forzar la flotación de la escoria para su eliminación.

## EFFECTO DESGASIFICADO

- Función: reducir el nivel de gas del caldo .
- Caudal de nitrógeno: de 11 litros/ min.
- Niveles adecuados de gas en moldeo:
  - Valores adecuados para moldeo del 7%.
  - **IMPORTANTE:** nunca superar el 12% por los rechazos generados en diamantado.



Las batidoras FDU tienen dos funciones que se realizan de manera simultánea:

- Desescoriado
- Desgasificado

Efecto limpieza:

Arranque: genera un vortex (30seg) para mezclar bien el aluminio y el desescoriente.

Mezclado sin Vortex.

Últimos 30 seg se introduce la paleta para forzar la flotación de la escoria para su eliminación.

Efecto desgasificado:

Función: reducir el nivel de gas del caldo .

Caudal de nitrógeno: de 11 litros/ min.

Niveles adecuados de gas en moldeo:

Valores adecuados para moldeo del 7%.

**IMPORTANTE:** nunca superar el 12% por los rechazos generados en diamantado.

## 2. IMPORTANCIA DESESCORIADO.

---



### IMPORTANTE REALIZAR CORRECTAMENTE EL DESESCORIADO

- La presencia de escoria perjudica las propiedades mecánicas de la llanta.
- Por lo tanto genera un riesgo de rotura de la rueda.
- La presencia de escoria perjudica el acabado estético de las ruedas con acabado diamantado.



### Importancia correcto desescoriado

Es muy importante que la etapa de limpieza se realice correctamente ya que:

La presencia de la escoria perjudica las propiedades mecánicas de la rueda.

Por lo tanto existe un riesgo de rotura de la rueda.

La presencia de escoria perjudica el acabado estético en las ruedas con acabado diamantado.

Se muestra la rueda donde se ven los defectos.

### 3. IMPORTANCIA DESGASIFICADO.

#### CONSECUENCIA DE TRABAJAR CON NIVELES BAJOS DE GAS

FECHA	TURNO	BUENAS	MALAS	MALAS RX	TOTAL	% Gas			
01/02/16	Noche	3.698	26	0,70%	105	2,84%	131	3,52%	
02/02/16	Mañana	3.583	30	0,83%	102	2,85%	132	3,65%	
02/02/16	Tarde	3.598	29	0,80%	100	2,78%	129	3,56%	
02/02/16	Noche	3.697	29	0,78%	152	4,11%	181	4,86%	
03/02/16	Mañana	3.657	36	0,97%	123	3,36%	159	4,31%	
03/02/16	Tarde	3.669	32	0,86%	141	3,84%	173	4,67%	
03/02/16	Noche	3.689	58	1,55%	145	3,93%	203	5,42%	
04/02/16	Mañana	3.701	30	0,80%	95	2,57%	125	3,35%	
04/02/16	Tarde	3.709	35	0,93%	71	1,91%	106	2,83%	



Pasar de 203 piezas de defectivo a 106, suponen 97 piezas de defectivo, es decir, 8 horas de trabajo de una de las máquinas.

La tabla muestra cómo se comenzó la primera semana de febrero con el turno de noche del día 1 con un nivel de 2.84%, un nivel de rechazos normal. Dicho nivel fue aumentando a partir del día 2 hasta el día 3. En este caso estos altos niveles de defectivo se corresponden con una baja cantidad de gas en el caldo. Como consecuencia los niveles de gas con los que trabajaron en moldeo durante esos días fueron de 3.5% - 4% en máquina vacía.

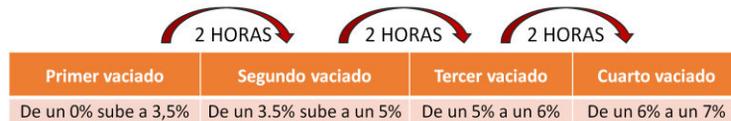
Por esto, el día 4 por la mañana se realizaron dos rondas de llenado de los hornos sin desgasificar, es decir en las FDUs únicamente se aplicó desescoriante y se anularon los caudales de nitrógeno, con el objetivo de aumentar de manera rápida los niveles de gas en los hornos. Gracias a esto, se consiguió aumentar los niveles de gas hasta valores próximos al 6.0% y de este modo reducir casi a la mitad los niveles de defectivo.

El pasar de 203 a 106 piezas de defectivo supone una diferencia de 97 piezas, es decir 8 horas de trabajo de una moldeadora.

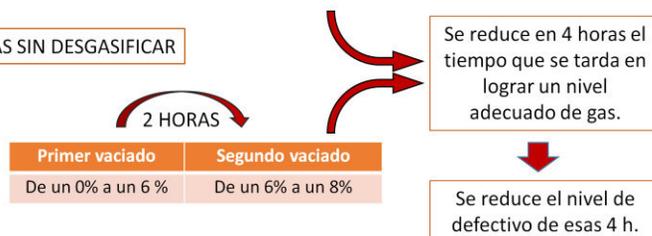
### 3. IMPORTANCIA DESGASIFICADO.

**ARRANQUE DOMINGO – EFECTO PARADA** → En 24 horas el caldo que queda en los hornos baja hasta un 0%.

DESGASIFICADONDO



DOS RONDAS SIN DESGASIFICAR



El efecto parada consiste en que en 24 horas el caldo que queda en los hornos tras el turno del sábado a la mañana baja a nivel del 0% para cuando se empieza el turno de noche del domingo.

Si se hace el llenado de los hornos realizando el degasificado de las cucharas se tardan 6 horas en alcanzar niveles adecuados de gas ya que entre cada llenado pasan 2 horas.

Si se hace el llenado de los hornos sin degasificar, es decir sin inyectar nitrógeno y eliminando únicamente la escoria se tardan solo 2 horas en alcanzar niveles adecuados de gas.

Por lo tanto si se realizan dos rondas de vaciado sin degasificar se tarda 4 horas menos en alcanzar un nivel adecuado de gas. Por lo tanto se consigue reducir el nivel de defectivo provocado por esas 4 horas de niveles inadecuados de gas.

## 4. MÉTODO DE TRABAJO.



### MANTENIMIENTO DEL EJE

- Es muy importante que el eje esté correctamente limpio para permitir que el aluminio pase a través de las ventanas y se revuelva bien para generar un buen vortex y mejorar la mezcla del desescoriente.
- Además, el gas al pasar a través de las ventanas, se rompe en burbujas más pequeñas que mejoran el desgasificado.
- Es muy importante también que el eje esté centrado respecto de la cuchara para que el vortex se genere adecuadamente.
- Asegurarse de que el canal de salida del nitrógeno no está obstruido.
- Vídeo 1: Como se generan las burbujas.
- Vídeo 2: Generación del vortex y arrastre de la escoria (0:40 min).



En cuanto al método de trabajo es muy importante realizar un correcto mantenimiento del eje de las batidoras.

Es muy importante que el eje esté correctamente limpio para permitir que el aluminio pase a través de las ventanas y se revuelva bien para generar un buen vortex y mejorar la mezcla del desescoriente.

Además, el gas al pasar a través de las ventanas, se rompe en burbujas más pequeñas que mejoran el desgasificado.

Es muy importante también que el eje esté centrado respecto de la cuchara para que el vortex se genere adecuadamente.

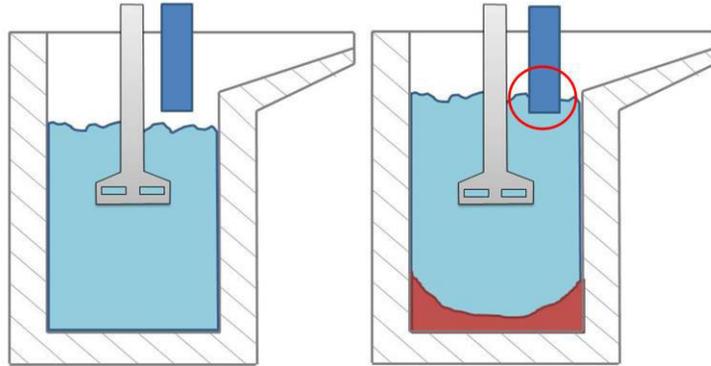
Asegurarse de que el canal de salida del nitrógeno no está obstruido.

Vídeo 1: como se generan las burbujas.

Vídeo 2: video del vortex, como arrastra la escoria. ( 0:40 min)

## 4. MÉTODO DE TRABAJO.

### LIMPIEZA DE LAS CUCHARAS

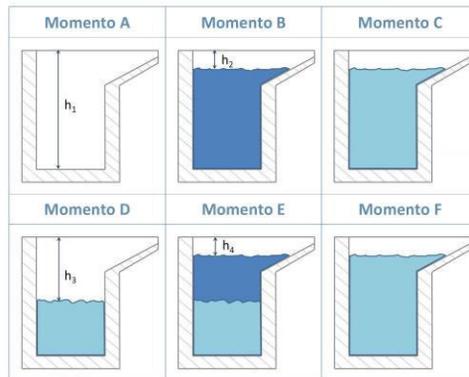


Para que el vortex se genere bien la paleta durante la primera etapa del proceso debe quedar totalmente fuera del caldo.

Para ello es importante que el fondo de las cucharas esté limpio. Ya que si no, aun llevando nivel de caldo normal, altura del caldo sube como consecuencia de la pérdida de capacidad y puede alcanzar la paleta.

## 4. MÉTODO DE TRABAJO.

### NIVEL DE CALDO EN LA CUCHARA



A - Totalmente vacía  
B - Llenada con el reverbero  
C - Desgasificada  
D - Retorno de caldo desde moldeo  
E - Llenada de nuevo  
F - Desgasificada

Se ha medido la altura del caldo y el nivel de gas en cada uno de los 6 momentos



A - Se parte de la cuchara totalmente vaciada, sin nada de caldo. Por lo tanto el nivel de gas de partida es de 0 %, ya que no hay aluminio.

B - Se llena la cuchara totalmente y se mide su porcentaje de gas antes de desgasificar y la altura del caldo dentro de la cuchara

C - Se mide el porcentaje de gas después de desgasificar.

D - Se mide la altura del caldo al retornar el vaciador de moldeo y se mide el nivel de gas.

E - Se vuelve a llenar la cuchara con caldo del reverbero. Se mide la altura y el nivel de gas.

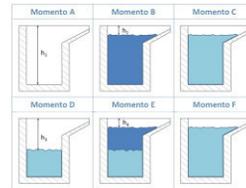
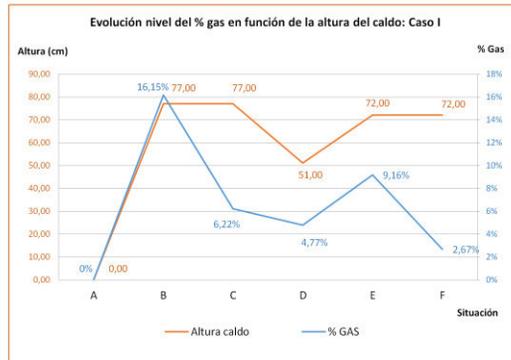
F - Después de desgasificar, se vuelve a medir el nivel de gas.

Para estudiar cómo afecta el nivel de retorno al % de gas se realiza el mismo ensayo en dos circunstancias distintas:

- Caso I: la altura de caldo de retorno es muy grande.
- Caso II: la altura de caldo de retorno es normal, y con el que se debería trabajar.

## 4. MÉTODO DE TRABAJO.

### NIVEL DE CALDO EN LA CUCHARA – NIVEL INNADECUADO



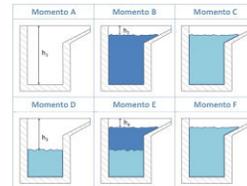
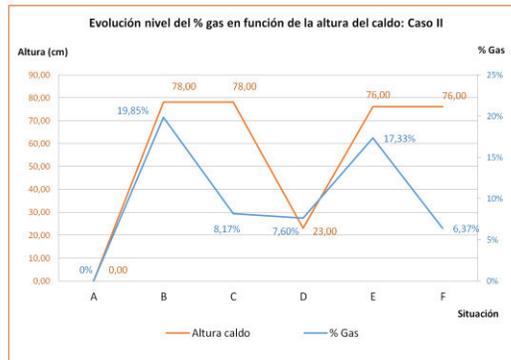
Se observa que de A a B, se realiza el llenado de la cuchara hasta alcanzar 77 cm con un nivel de gas de 16.15%. A continuación entre B y C se produce el desgasificado en la batidora FDU, bajando el nivel de gas hasta 6.22%, un valor que se encuentra dentro de los límites del SPC. Después, tras vaciar en moldeo (de C a D), se observa que el nivel de caldo ha bajado hasta 51 cm (se ha vaciado 26 cm). Asimismo, el nivel de gas ha disminuido, probablemente porque al disminuir la temperatura del aluminio, este pierde capacidad de disolución de gas.

A continuación se vuelve a llenar la cuchara con aluminio del reverbero hasta 72 cm, subiendo el gas hasta el 9.16%. Se observa que el nivel de gas es mucho más bajo que en el primer llenado. Esto se debe a que en la cuchara hay una gran cantidad de caldo ya desgasificado, y que al mezclarse con el aluminio del reverbero, el gas de la mezcla resultante se encuentra entre ambos valores.

Finalmente se vuelve a desgasificar el aluminio con la cuchara FDU (de E a F) y se observa que el nivel de gas es de 2.67%, un nivel extremadamente bajo y cuyo valor se encuentra por debajo del límite inferior de control del SPC.

## 4. MÉTODO DE TRABAJO.

### NIVEL DE CALDO EN LA CUCHARA – NIVEL INNADECUADO



Las fases son iguales a las del Caso I. Sin embargo se puede observar una clara diferencia en los niveles de gas a partir del momento C. Se observa que tras desgasificar la primera vez, se obtiene un nivel de gas de 8.17% ligeramente superior, dado que el nivel de gas de la colada del reverbero es también mayor (19.85%). Dicho valor se encuentra dentro de los límites del SPC. Durante el vaciado en moldeo el aluminio ha bajado el nivel de caldo en 55 cm y también se ha desgasificado. Tras volver a llenarlo con caldo del reverbero, el nivel de gas de la mezcla es de 17.33%, algo inferior al del primer llenado, dado que seguimos teniendo caldo desgasificado en la cuchara, pero su efecto es mucho menor. Finalmente al volver a desgasificar, obtenemos un nivel de gas de 6.37% que se encuentra también dentro de los límites del SPC.

## 4. MÉTODO DE TRABAJO.

---



¿SUGERENCIAS Y PROPUESTAS DE MEJORAR?

