

Modelamiento de variables de proceso de tratamiento termico para bolas fundidas de acero de 3 pulgadas - bolas para molienda de minerales

Modelling of variables for heat treatment process for casting grinding balls of 3" inch diameter

Salvatore Mancha Gonzales¹

RECIBIDO: 10/11/2015 - APROBADO: 30/06/2016

RESUMEN

Se busca un modelo a partir de las variables de proceso productivo para pronosticar la dureza superficial de bolas de acero de 3 pulgadas de diámetro. Se considera como variable independiente el indicador DI en reemplazo de composición química. La data analizada corresponde a 43 controles. En los cuales se considera inicialmente 10 variables independientes y una variable dependiente como la dureza superficial de la bola (HRC). El tratamiento de datos inicia con un análisis descriptivo del tipo de relación entre las variables independientes y dependiente, para luego reducir las variables independientes, luego aplicar el método de regresión lineal múltiple. El modelo inicial a considera es del tipo $Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \epsilon$ para luego quedar como $Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7$. A este modelo se evaluó, multicolinealidad, entre variables independientes por el método de matriz inversa de correlaciones. También se probó la normalidad y homoscedasticidad de residuos. El valor encontrado para $R^2 = 0.97056$. La prueba de significancia global de los coeficientes rechaza hipótesis nula $H_0 : \beta_1 = \beta_i = 0$ y acepta hipótesis alterna al menos un coeficiente es diferente de cero por tener p -valor < 0.05 .

Palabras clave: Temple, dureza, bola, templabilidad, tratamiento térmico, molienda.

ABSTRACT

The aim of study was to achieve a model which forecast superficial hardness of casting grinding balls of 3 inch diameter. Process variables were considered to develop the model. Chemical composition was not considered, Instead of this, DI was considered as independent variable, Data were taken of 43 controls for production process. At beginning 10 independent variables were considered, then these were reduce to 7. Superficial hardness was considered as dependent variable (HRC). Data analysis begins with descriptive analysis of relations between dependent variable and independent variable. Then Multiplied Linear regression was performed over data. The first model considered was $Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \epsilon$. After modified to $Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7$. For the last model, Multicollinearity was analyzed between independents variables by the inverse correlation matrix method. Also normality and homoscedastic of residual were evaluated. The value for determination coefficient $R^2 = 0.97056$. Global significance test rejects null hypothesis $H_0 : \beta_1 = \beta_i = 0$ and accept alternative hypothesis. At least one coefficient is different from zero because p -value < 0.05 .

Keywords: Grinding balls, heat treatment, quenching, hardness.

¹ Ingeniero Metalúrgico (UNMSM), Supervisor de Producción en Metalúrgica Peruana S.A - MEPSA. E-mail: salvatore_mancha@mail.com

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos en procesos de tratamiento térmicos en industria es asegurar la calidad de la pieza a tratar, más aún si es de producción masiva, como es el caso de las bolas de acero para molienda de minerales. Por consiguiente es necesario el modelamiento de las variables de proceso de tratamiento térmico. Lo cual busca el efecto de cada variable sobre la dureza superficial de la bola.

Para el proceso de temple de bola para molienda se tiene en cuenta variables propias del proceso, desde la etapa calentamiento y enfriamiento, así como la composición química del acero. En este estudio se emplea el Indicador DI como reemplazo de la composición química para así reconocer y jerarquizar la influencia de cada variable del proceso sobre la dureza superficial de la bola.

El concepto de templabilidad indica que es la propiedad que influye en la profundidad y homogeneidad de la dureza en el acero; los factores que influyen en esta propiedad son, la composición química del acero, velocidad de enfriamiento, medio de temple entre otras más. Una prueba estandarizada para determinar la templabilidad es la Jominy Test ASTM A 225 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel (ASTM Book of Standards Volume: 01.05; 2014) el cual mantiene los parámetros de proceso fijo y solo varía el tipo de acero a probar en la prueba.

Los modelos de templabilidad ofrecen un dato relevante cuando se quiere comparar aceros de diferente composición bajo un mismo proceso estándar, similar al de la prueba Jominy, pero es de poca ayuda cuando se quiere evaluar un acero templado bajo otro proceso, más aun si el proceso es de tipo industrial. Esta diferencia podría ser explicada en parte por las características propias del proceso, como tipo de horno, sistema de temple, medio de temple, además de la forma y tamaño de la pieza a templar.

Para el caso de bolas de acero fundidas para molienda (Ø 3"). El proceso se realiza de manera continua, empleando equipamiento e instalación para este propósito. El equipamiento a emplear es horno tipo continuo por transporte mediante faja, medio de temple a base de solución acuosa y una tornamesa sumergida, que regula el tiempo de inmersión de la bola en el medio de temple.

Para este proceso se puede considerar los siguientes factores influyen en la práctica de temple:

- Tamaño de la bola: La que determina su velocidad crítica.
- Composición Química: a igual composición, la velocidad crítica de grano grueso es inferior a la del grano fino.
- Medio de enfriamiento" (Torres,2007)

Todos estos factores influyen directamente en la templabilidad y por consiguiente en la dureza de la bola.

Para un mejor control de proceso, se hace necesario contar con un modelo que permita predecir la dureza super-

ficial a partir de los factores propios del proceso. Por esto se ve oportuno desarrollar un modelo que considere los factores del proceso y entregue como resultado la dureza superficial de la bola.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se pretende construir un modelo el cual queda por determinar los coeficientes de cada factor a considerar. Los coeficientes serán determinados mediante un análisis por regresión lineal múltiple. (García, 2013)

El modelo queda determinado por las variables de proceso que presenta mayor proporción de varianza explicada acumulada. Los pasos para la elaboración del modelo será:

1. Prepararon de los formatos de registro del proceso estudiado.
2. Toma de muestra de bola después del temple, para medición de durezas superficial de la bola.
3. Análisis de las variables para la reducción de los factores mediante análisis descriptivo de relación y Análisis Componentes Principales (ACP).
4. Con las variables reducidas se procede al análisis por regresión lineal múltiple.
5. Discusión de resultados y conclusiones.

2.1. Experimentación

Se registran datos directamente del proceso productivo, por lo cual se llena los formatos, las primeras variables a analizar. Ver Tabla N.º 1

Tabla N.º 1. Resumen de variables iniciales Independientes.

| VARIABLES INDEPENDIENTES | UNIDAD | CODIGO |
|---|----------|--------|
| Indicador templabilidad | --- | DI |
| Temperatura primera zona del horno | (°C) | Z1 |
| Temperatura segunda zona del horno | (°C) | Z2 |
| Temperatura tercera zona del horno | (°C) | Z3 |
| Temperatura cuarta zona del horno | (°C) | Z4 |
| Velocidad de avance de la faja | (ft/min) | VEL |
| Tiempo permanencia bola en medio temple | (seg) | TPB |
| Presion de solucion acuosa en tornameza | psi | PSI |
| Temperatura del medio de temple | (°C) | TAG |
| Concentracion de la solucion en el medio temple | (%) | CON |

Fuente: Propia

La variable dependiente se muestra en la Tabla N.º 2

Tabla N.º 2. Resumen de Variable Dependiente.

| VARIABLE DEPENDIENTE | UNIDAD | CODIGO |
|----------------------------------|--------|--------|
| DUREZA ROCKWELL en la superficie | HRC | HAR |

Fuente: Propia

La toma de dureza se realizará bajo la norma ASTM E18 - 08b Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.

2.1. Análisis de datos

En un inicio se considera 10 variables independientes, las cuales fueron graficadas vs variable dependiente, (Ver Figura N.º 01).

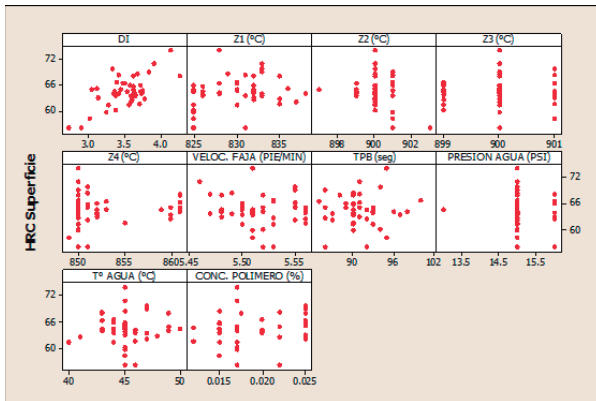


Figura N.º 1. Relación variable dependiente (HRC Superficial Hardness) y variables independientes.

De la Figura N.º 1 se puede observar amplia dispersión de los datos en torno a HRC. La relación HRC Vs DI se muestra relación lineal positiva o directa, pero imperfecta. Para HRC vs Z1, se muestra relación lineal forma de abanico; HRC vs Z2, HRC vs Z3 se muestran relación no lineal, por lo cual se excluirán. HRC vs Z4 muestra relación curvilínea, se probará como lineal, de lo contrario será transformado la variable Z4. HRC vs Velocidad faja, TPB se muestra relación no lineal, más dispersa sin llegar a ser rombo, para los cuales se probara como lineal de lo contrario se transforma. Para HRC vs Presión de agua no se muestra relación solo alta concentración en un valor particular de presión pero una alta dispersión en HRC, por lo que se descarta esta variable. Para HRC vs Temp. Agua y concentración polímero se muestra relación lineal dispersa, se probará en el modelo.

Después de separar 3 variables (Z2, Z3, Presión agua) se procede a aplicar análisis de componentes principales para observar el porcentaje de variación acumulado. Ver Tabla N.º 3.

Tabla N.º 3. Resumen de Eigenanálisis de la matriz de correlación.

| | DI | Z1 (°C) | Z4 (°C) | VELOC. FAJA (PIE/MIN) | TPB (seg) | T° AGUA (°C) | CONC. POLIMERO (%) | Z2 (°C) | Z3 (°C) | PRESION AGUA (PSI) |
|------------|--------|---------|---------|-----------------------|-----------|--------------|--------------------|---------|---------|--------------------|
| Eigenvalue | 2.0687 | 1.7515 | 1.3039 | 1.2149 | 1.0224 | 0.9106 | 0.5823 | 0.4892 | 0.4293 | 0.2272 |
| Proportion | 0.207 | 0.175 | 0.13 | 0.121 | 0.102 | 0.091 | 0.058 | 0.049 | 0.043 | 0.023 |
| Cumulative | 0.207 | 0.382 | 0.512 | 0.634 | 0.736 | 0.827 | 0.885 | 0.934 | 0.977 | 1 |

Fuente: Propia.

De la fila Cumulative se puede observar la variación acumulada explicada por las variables independientes. El valor acumulado hasta la variable concentración de polímero es de 0.885; por lo que las tres últimas tres variables solo representa 0.115. Las 3 variables descartadas (Z2, Z3, Presión de agua) no representarían mayor pérdida.

Seguido se aplica método para regresión lineal múltiple para las 7 variables independientes y variable dependiente.

2.2. Estimación de la regresión

Variables Independientes: DI, Z1 (°C), Z4 (°C), Veloc Faja (pie/min), TPB (seg), T° Agua (°C), Conc Polimero (%)

Variable Dependiente: HRC Superficie

Para el análisis se recoge datos de 43 controles para cada variable directamente del proceso, para el caso de dureza, se toma muestra de bola testigo y prepara para la medición superficial.

Los datos tabulados se analizan utilizando la opción de herramientas de análisis de Excel, señalando los datos de entrada, Rango Y, Rango X, Constante igual a cero. Obteniéndose los siguientes resultados. Ver Tabla N.º 4 y Tabla N.º 5.

Tabla N.º 4. Resumen de las estadísticas de regresión.

| Estadísticas de la regresión | |
|------------------------------------|------------|
| Coficiente de correlación múltiple | 0.99928805 |
| Coficiente de determinación R^2 | 0.9985766 |
| R^2 ajustado | 0.97056159 |
| Error típico | 2.66162986 |
| Observaciones | 43 |

Fuente: Propia.

Tabla N.º 5. Resumen de análisis de regresión.

| | Coefficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% |
|-----------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Intercepción | 0 | #N/A | #N/A | #N/A | #N/A | #N/A |
| DI | 8.00135933 | 1.49464088 | 5.35336578 | 5.0847E-06 | 4.970087 | 11.03263 |
| Z1 (°C) | 0.00365751 | 0.11055172 | 0.0330842 | 0.9737902 | -0.22055 | 0.227867 |
| Z4 (°C) | 0.11664039 | 0.10535623 | 1.10710482 | 0.27559148 | -0.09703 | 0.330313 |
| VELOC. FAJA (PIE/MIN) | -13.9675728 | 13.3304777 | -1.04779237 | 0.30171829 | -41.003 | 13.06789 |
| TPB (seg) | 0.14917951 | 0.13198909 | 1.1302412 | 0.26584889 | -0.11851 | 0.416866 |
| Tº AGUA (°C) | -0.1593479 | 0.23922148 | -0.66611032 | 0.50958685 | -0.64451 | 0.325816 |
| CONC. POLIMERO (%) | 2.3798441 | 1.10644018 | 2.15090173 | 0.03827104 | 0.135879 | 4.623809 |

Fuente: Propia

Los resultados muestran los coeficientes

$$DI = 8.00135$$

$$Z1 (°C) = 0.00365$$

$$Z4 (°C) = 0.11664$$

$$\text{Velc Faja (pie/min)} = -13.96757$$

$$TPB (seg) = 0.14917$$

$$Tº Agua (°C) = -0.15934$$

$$\text{Conc. Polimero (\%)} = 2.37984$$

La ecuación simplificada sería del tipo:

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7 \quad (1)$$

Donde: β_1 : 8.00135; β_2 : 0.00365;
 β_3 : 0.11664; β_4 : -13.96757;
 β_5 : 0.14917; β_6 : -0.15934;
 β_7 : 2.37984

El valor 8.00135 expresa que por cada grado de DI que se incrementa, la dureza se incrementará 8.00135 HRC. Por otro lado, se tiene el valor 0.00365 el cual nos indica que por cada incremento de temperatura Z1, la dureza se incrementa solo un 0.00365(Z1).

Para el valor negativo -13.96757 expresa que por cada grado de (Velc) la dureza se disminuirá -13.96757HRC. También sucede con el valor -0.15934 expresa que con cada grado de temperatura, la dureza de disminuirá en -0.15934HRC.

2.3. Evaluación de la ecuación de regresión

Para la evaluación del modelo de regresión se contrastará las siguientes hipótesis:

Ho: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = \beta_7 = 0$ Ninguna de las variables independientes explica de manera significativa el valor de Y

$$H_1: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq \beta_5 \neq \beta_6 \neq \beta_7 \neq 0$$

Al menos un coeficiente es diferente de 0 e influye de manera significativa en el valor de Y

Criterio de decisión será:

Si p-valor < 0.05 se rechaza H_0

Si p-valor > 0.05 se acepta H_0

De la Tabla N.º 6 (ANOVA) podemos encontrar en la columna de significancia el p-valor = 4.4629E-48, lo cual evidencia el p-valor < 0,05, según nuestro criterio de aceptación, se rechaza H_0 y acepta H_1 , el cual señala que al menos un coeficiente es diferente de 0. Ver tabla Nª 6

Tabla N.º 6. Resumen de análisis de la varianza.

ANÁLISIS DE VARIANZA

| | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados | F | Valor crítico de F (P-value) |
|-----------|--------------------|-------------------|---------------------------|------------|------------------------------|
| Regresión | 7 | 178917.266 | 25559.6095 | 3607.93658 | 4.5379E-48 |
| Residuos | 36 | 255.033845 | 7.08427349 | | |
| Total | 43 | 179172.3 | | | |

Fuente: Propia.

2.4. Interpretación del coeficiente de determinación y error típico

Una observación al coeficiente de determinación (R^2) en la tabla Estadísticas de regresión, en la fila R^2 para el modelo, presenta un valor de 0.9985766 y un R^2 ajustado de 0.97056159 para el mismo modelo. Esto se corrobora mediante el cálculo de: $R^2 = \text{Suma de cuadrados de Regresión} / \text{Suma cuadrados Total}$, tomando los datos de la Tabla N.º 6 (ANOVA) $R^2 = 178917.266 / 179172.3 = 0.998576$ de esto último, se puede afirmar lo siguiente: El 99.85% de la variación total observada en la dureza de la superficie de la bola de 3" esta explicado por la línea de regresión estimada.

Para la interpretación del error típico, se empleara la siguiente formula

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n - k} \quad (2)$$

Donde:

S^2 : desviación del pronostico

n : número de datos

k : número de variables predictorias

e_i^2 representa la desviación del valor pronosticado al cuadrado

$$e_i = y_i - y_i' \quad (3)$$

Donde :

e_i : desviación del valor pronosticado

y_i : valor real medido

y_i' : valor pronosticado

Tabla N.º 6. Resumen de datos para estimación del error.

| y_i' | y_i | e | e^2 |
|-------------|-------|-------------|-------------|
| 62.69899362 | 64.5 | 1.801006379 | 3.243623976 |
| 63.84220149 | 61.3 | -2.54220149 | 6.462788398 |
| 64.21732903 | 65.8 | 1.582670972 | 2.504847406 |
| 62.75089956 | 63.6 | 0.849100437 | 0.720971553 |
| 64.89253021 | 68.5 | 3.607469792 | 13.0138383 |
| 65.14713316 | 64.7 | -0.44713316 | 0.19992806 |
| 63.62613007 | 61.6 | -2.02613007 | 4.105203047 |
| 63.7753597 | 66 | 2.224640303 | 4.949024477 |
| 63.81070812 | 63.5 | -0.31070812 | 0.096539537 |
| 65.54957404 | 64.2 | -1.34957404 | 1.821350091 |
| 67.29077253 | 63.5 | -3.79077253 | 14.36995637 |
| 66.17669598 | 64.2 | -1.97669598 | 3.907326983 |
| 64.68653936 | 66.7 | 2.01346064 | 4.054023749 |
| 66.44059576 | 64.5 | -1.94059576 | 3.765911914 |
| 64.60524018 | 64.1 | -0.50524018 | 0.255267637 |
| 67.68575378 | 71 | 3.314246216 | 10.98422798 |
| 62.70623602 | 61.3 | -1.40623602 | 1.977499746 |
| 62.59259536 | 64.5 | 1.907404643 | 3.63819247 |
| 61.48976372 | 59.8 | -1.68976372 | 2.855301431 |
| 64.58273251 | 65 | 0.417267491 | 0.174112159 |
| 69.38159129 | 74 | 4.618408713 | 21.32969904 |
| 63.00153198 | 60.2 | -2.80153198 | 7.848581413 |

| y_i' | y_i | e | e^2 |
|-------------|-------|-------------|-------------|
| 63.74655416 | 65 | 1.25344584 | 1.571126473 |
| 64.56656117 | 64 | -0.56656117 | 0.320991563 |
| 59.74366232 | 58.2 | -1.54366232 | 2.382893353 |
| 57.51730014 | 56 | -1.51730014 | 2.302199713 |
| 63.86752372 | 69.7 | 5.832476285 | 34.01777961 |
| 66.26352223 | 62.7 | -3.56352223 | 12.6986907 |
| 58.96000444 | 56 | -2.96000444 | 8.761626296 |
| 62.18797551 | 65.1 | 2.91202449 | 8.479886632 |
| 66.66370014 | 69.1 | 2.436299863 | 5.935557023 |
| 71.05906642 | 68 | -3.05906642 | 9.357887386 |
| 63.25317728 | 63 | -0.25317728 | 0.064098736 |
| 64.93380704 | 62.2 | -2.73380704 | 7.473700907 |
| 66.04920109 | 68 | 1.950798914 | 3.805616404 |
| 66.40083187 | 68.2 | 1.799168131 | 3.237005962 |
| 66.44014642 | 66.3 | -0.14014642 | 0.019641019 |
| 63.51853095 | 64 | 0.481469049 | 0.231812445 |
| 65.1608587 | 66.4 | 1.239141296 | 1.535471152 |
| 66.9016615 | 66 | -0.9016615 | 0.812993463 |
| 66.97167628 | 62.5 | -4.47167628 | 19.99588878 |
| 65.47052253 | 63.7 | -1.77052253 | 3.134750047 |
| 60.95363233 | 65 | 4.046367669 | 16.37309131 |

Fuente: Propia

El valor estimado para la serie de datos medidos y pronosticados coincide con el error típico mostrado en la tabla. (Ver tabla N.º 7) Estadísticas de la regresión igual a 2.66163. Esto se entiende como la variabilidad de los valores de dureza observada con respecto a la dureza esperada, es de 2.66 HRC.

| | |
|--------------|---------|
| sum(e^2) | 255.034 |
| n-k | 36 |
| s^2 | 7.08427 |
| s | 2.66163 |

2.5. Análisis de multicolinealidad

Se entiende que la existencia de colinealidad o multicolinealidad entre las variables independientes no permitiría calcular los coeficientes de regresión. Una colinealidad parcial dejaría coeficientes de regresión muy inestables, los cuales cambiarían drásticamente al eliminar o agregar un dato, la no colinealidad, permitiría determinar coeficientes más estables.

Si $VIF > 3$ colinearidad podría estar presente.

$VIF > 10$ Indica claramente multicolinealidad.

$VIF < 3$ La colinearidad no está presente.

Para nuestro análisis emplearemos la matriz de correlaciones (Ver Tabla N.º 7) que al tomar la inversa nos muestra los valores VIF en la diagonal principal. Ver Tabla N.º 8.

Tabla N.º 7. Matriz de correlaciones.

| | DI | Z1 (°C) | Z4 (°C) | VELOC. FAJA (PIE/MIN) | TPB (seg) | Tª AGUA (°C) | CONC. POLIMERO (%) |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|--------------|--------------------|
| DI | 1 | 0.28021138 | -0.04285386 | -0.15119728 | -0.01175695 | 0.27980477 | -0.05098927 |
| Z1 (°C) | 0.28021138 | 1 | 0.21575445 | 0.06584605 | -0.14701537 | 0.26434439 | 0.29849227 |
| Z4 (°C) | -0.04285386 | 0.21575445 | 1 | 0.15105262 | -0.01871576 | -0.35720332 | 0.11483832 |
| VELOC. FAJA (PIE/MIN) | -0.15119728 | 0.06584605 | 0.15105262 | 1 | -0.08079027 | 0.00261874 | 0.3151732 |
| TPB (seg) | -0.01175695 | -0.14701537 | -0.01871576 | -0.08079027 | 1 | -0.08908893 | -0.34460977 |
| Tª AGUA (°C) | 0.27980477 | 0.26434439 | -0.35720332 | 0.00261874 | -0.08908893 | 1 | 0.03457948 |
| CONC. POLIMERO (%) | -0.05098927 | 0.29849227 | 0.11483832 | 0.3151732 | -0.34460977 | 0.03457948 | 1 |

Fuente: Propia.

Tabla N.º 8. Matriz inversa de correlaciones.

| | DI | Z1 (°C) | Z4 (°C) | VELOC. FAJA (PIE/MIN) | TPB (seg) | Tª AGUA (°C) | CONC. POLIMERO (%) |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|--------------|--------------------|
| DI | 1.188927 | -0.30455665 | -0.0148153 | 0.16842089 | -0.00359638 | -0.26194663 | 0.10796857 |
| Z1 (°C) | -0.30455665 | 1.40383163 | -0.43116105 | 0.04841395 | 0.03172462 | -0.42423415 | -0.37470457 |
| Z4 (°C) | -0.0148153 | -0.43116105 | 1.33025988 | -0.1800491 | 0.00409305 | 0.59368697 | 0.01280578 |
| VELOC. FAJA (PIE/MIN) | 0.16842089 | 0.04841395 | -0.1800491 | 1.16002261 | -0.03466031 | -0.11796043 | -0.35866031 |
| TPB (seg) | -0.00359638 | 0.03172462 | 0.00409305 | -0.03466031 | 1.14445686 | 0.0825645 | 0.39233701 |
| Tª AGUA (°C) | -0.26194663 | -0.42423415 | 0.59368697 | -0.11796043 | 0.0825645 | 1.40301806 | 0.062211 |
| CONC. POLIMERO (%) | 0.10796857 | -0.37470457 | 0.01280578 | -0.35866031 | 0.39233701 | 0.062211 | 1.36197313 |

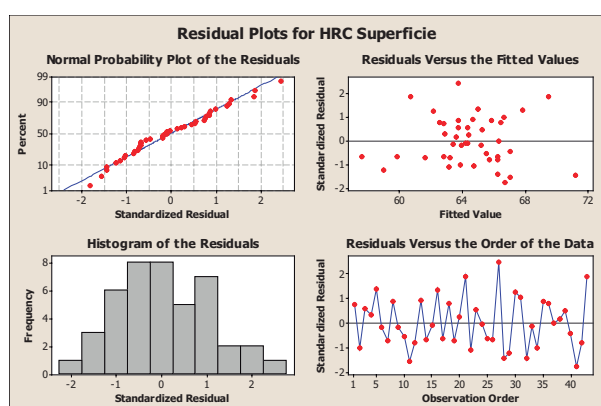
Fuente: Propia.

Se puede encontrar en todos los casos valores VIF menores a 3 muy próximos a 1, por lo que se acepta que no existe multicolinealidad entre las variables independientes.

2.6. Análisis de supuesto de homoscedasticidad y normalidad

La gráfica Normal Probability Plot of the Residuals, muestra varios puntos que coinciden con la línea recta, además en el Histograma of the Residuals se observa simetría por lo que podría considerarse como distribuidos normalmente.

Figura N.º 2. Gráfica de análisis de residuales.



Del gráfico Residuals Vs Fitted Values (Ver Figura N.º 2) no hay valores que se encuentre fuera de -2 y solo un valor está ligeramente por encima +2, por lo que solo se observa un valor atípico. Se puede aceptar las hipótesis de linealidad del modelo

En el gráfico Residual vs Orde of the Data (Ver Figura N.º 2) sugiere que la varianza de los errores es constante, porque no hay patrón definido que siguen los puntos es decir sugiere homoscedasticidad

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Evaluación del modelo

Se cuenta con la ecuación lineal, que permite predecir la dureza superficial a partir de las variables de proceso.

$$\text{HRC} = 8.00135(\text{DI}) + 0.00365(\text{Z1}) + 0.11664(\text{Z4}) - 13.96757(\text{Velc}) + 0.14917(\text{TPB}) - 0.15934(\text{T}^\circ \text{ Agua}) + 2.37984(\text{Conc. Polimero}) \quad (4)$$

No se presenta multicolinealidad entre las variables independientes, se cumple con los supuestos de normalidad y homoscedasticidad de los residuos, lo cual muestra la estabilidad de los coeficientes de la ecuación y cierto valor de significancia de la ecuación.

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| DI | = | 8.00135 |
| Conc. Polimero(%) | = | 2.37984 |
| TPB (seg) | = | 0.14917 |
| Z4 (°C) | = | 0.11664 |
| Z1 (°C) | = | 0.00365 |
| T° Agua (°C) | = | -0.15934 |
| Velc Faja (pie/min) | = | -13.96757 |

Los coeficientes encontrados para el modelo permiten determinar señalar a la variable que más influye en el incremento de la dureza, así como cierta cuantificación por cada unidad que incrementa en cada variable. Esto en la práctica específica sobre que variable se debe tener mayor control para no perder dureza en la bola, siendo el DI la variable que más influye ($8.00135 * \text{DI}$) en la obtención de dureza, seguido de la concentración de polímero ($2.37984 * \text{Conc. Polímero}$).

Otra variable que influye positivamente pero en menor cuantía es el tiempo de permanencia de la bola ($0.14917 * \text{TPB}$) y el último registro de temperatura de la bola a la salida del horno ($0.11664 * \text{Z}_4$) antes de templar. También influye positivamente la temperatura de la primera zona o ingreso al horno ($0.00365 * \text{Z}_1$). Ver Figura N.º 3

Las variables que influyen negativamente o presenta una influencia inversa sería la temperatura del agua del medio de temple ($-0.15934 * \text{T}^\circ \text{ Agua}$) y velocidad de la faja ($-13.96757 * \text{Velc}$). Esto se puede entender como a mayor temperatura de agua menos dureza se obtiene en la bola y a mayor velocidad de avance de la faja, menor dureza final en la superficie de la bola. Ver Figura N.º 4

Una explicación en términos del fenómeno estudiado sería: un insuficiente tiempo de calentamiento de la pieza para completar la transformación austenítica y de allí un baja rapidez de enfriamiento lo cual no contribuye a que la transformación martensítica sea completa a través de la sección transversal o radio de la bola. Es decir un mal temple por poco calentamiento y lento enfriamiento, lo cual deja como resultado baja dureza.

El incremento en la temperatura del medio de temple generaría una pronta evaporación del agua que rodea la superficie de la bola formando una capa gruesa de burbujas, conocida como vapor blanket cooling, lo cual dificultaría la rapidez de enfriamiento de la bola, generando poco cambio estructural por consiguiente baja dureza. (Totten,2002)

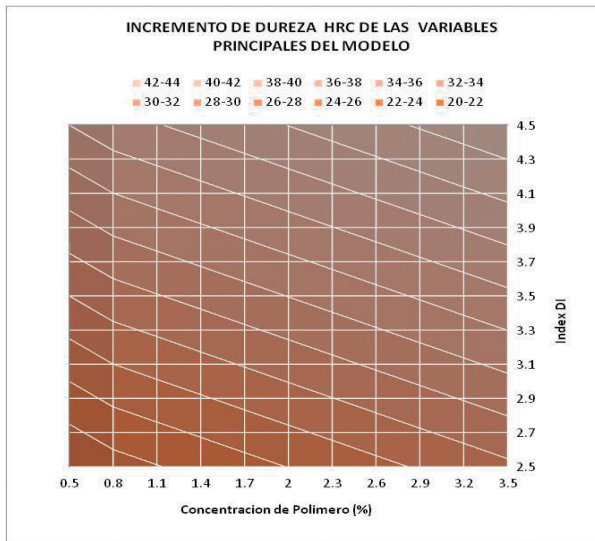


Figura N.º 3. Superficie de control para el incremento de Dureza HRC.

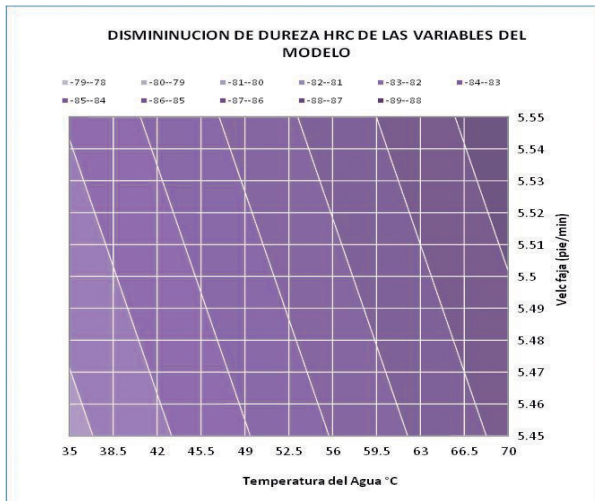


Figura N.º 4. Superficie de control para la disminución de Dureza HRC.

IV. CONCLUSIONES

1. Es posible determinar un modelo lineal para pronosticar la dureza en la superficie de la bola de 3". Para este modelo es de suma importancia el DI del acero de la bola, así como la concentración del polímero.
2. De las variables consideradas en la elaboración del modelo; la temperatura del medio de temple y la velocidad de la faja son significativamente sensibles por tener efecto inverso al incremento de dureza. Por lo que se requiere mayor cuidado para no tener material observado o rechazado por baja dureza.

V. AGRADECIMIENTOS

Al sector tratamiento térmico de la empresa metalúrgica que es donde se realiza los controles. Al instituto de investigación por la revisión y asesoramiento del trabajo realizado.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TORRES TORRES Víctor, Tratamiento térmico de bolas para molienda de minerales, Congreso de Metalurgia de la Transformación, Colegio de Ingenieros Perú, 200?, p 167.
2. E. TOTTEN George, *et al. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, ASM, 2002, p 275.
3. GARCÍA Jorge de la Garza, *et al. Análisis estadístico multivariante*, Mc Graw Hill, 2013, pp 45-70.
4. ASTM International. Consulta diciembre de 2015, <http://www.astm.org/Standards/A255.htm>

