

DISEÑO DE HERRAMIENTA PARA LA PROYECCIÓN Y CONTROL DE LA
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO CONCRETERO CON
APLICACIÓN EN UNA EMPRESA CEMENTERA

LINA ARAMBURO GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI

2012

DISEÑO DE HERRAMIENTA PARA LA PROYECCIÓN Y CONTROL DE LA
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO CONCRETERO CON
APLICACIÓN EN UNA EMPRESA CEMENTERA

LINA ARAMBURO GONZÁLEZ

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Industrial

DIRECTOR DEL PROYECTO

VICTOR JAVIER ESCALLÓN SANTAMARÍA

INGENIERO ELECTRÓNICO, MSc. INGENIERÍA INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD ICESI

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

SANTIAGO DE CALI

2012

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 TÍTULO.....	14
1.2 PROBLEMA	14
1.2.1 ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	14
1.2.2 FORMULACIÓN	15
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	15
1.4 ALCANCE Y DELIMITACIÓN	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
2.2 OBJETIVO DEL PROYECTO.....	17
2.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
3. MARCO DE REFERENCIA.....	18
3.1 ANTECEDENTES	18
3.2 MARCO TEÓRICO	19
3.2.1 Calidad	19
3.2.1.1. Capacidad o habilidad de un proceso	20
3.2.1.2 Estimación por intervalo.....	21
3.2.1.3 Medidas de dispersión y variabilidad	22
3.2.1.4 Distribución de probabilidad.....	23
3.2.1.5 Inferencia estadística	24
3.2.1.6 Prueba de hipótesis	24
3.2.1.7 Confiabilidad.....	25
3.2.1.8 Cartas de pre-control	25
3.2.2 Métodos de proyección, estimación y pronóstico de variables	26
3.2.2.1 Regresión	26

3.2.2.2 Pronósticos.....	27
3.2.2.2.1 Suavizamiento exponencial simple	28
3.2.2.2.2 Suavizamiento exponencial doble (Método de Holt)	30
3.2.2.2.3 Suavizamiento exponencial triple (Método de Holt - Winters)	31
3.2.2.3 Análisis de Componentes principales	33
3.2.2.4 Redes Neuronales	34
3.2.2.5 Evaluación de modelos.....	35
3.3 APORTE INTELECTUAL.....	36
4. METODOLOGÍA.....	37
4.1 ETAPAS DEL TRABAJO	37
4.1.1 Caracterización del proceso y análisis de variables	37
4.1.2 Diseño de metodología para lograr ajuste en los resultados de las pruebas de resistencia	37
4.1.3 Diseñar la metodología para identificar los momentos de alerta y alarma.	38
4.2 MARCO LÓGICO	38
4.3 ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO	38
4.3.1 Recursos	38
4.3.2 Cronograma	39
5. DESARROLLO DEL PROYECTO	40
5.1 CARACTERIZAR EL PROCESO Y ANALIZAR LAS VARIABLES Y PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A 28 DÍAS DEL CEMENTO CONCRETERO.	40
5.1.1 Proceso de fabricación del cemento	40
5.1.3 Resistencia a la compresión	48
5.1.3.1 Ensayo de resistencia a la compresión.....	49
5.1.3.2 Comportamiento de la resistencia a la compresión.....	56
5.1.4 Análisis de capacidad, probabilidades y pruebas de normalidad	58
5.1.6 Variables y parámetros que influyen en la resistencia a la compresión a 28 días.	67
5.2 METODOLOGÍA PARA PROYECTAR DE MANERA ANTICIPADA LA RESISTENCIA A 28 DÍAS	71

5.2.1 Evaluación de métodos de proyección	71
5.2.1.1 Regresión	71
5.2.1.2 Redes Neuronales	85
5.2.1.3 Análisis de componentes principales	86
5.2.1.4 Series de Tiempo.....	86
5.2.2 Método para estimar la resistencia a la compresión a 28 días	89
5.2.3. Resumen del modelo final de estimación de la resistencia a la compresión a 28 días	97
5.3 METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR LAS ACCIONES A TOMAR Y AJUSTAR LOS PARÁMETROS DEL PROCESO.....	98
6. CONCLUSIONES	102
7. RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	105
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Descripción de las fases del clinker	47
Tabla 2. Tolerancias permisibles en la edad de las pruebas	55
Tabla 3. Especificaciones de las resistencias	56
Tabla 4. Coeficiente de correlación entre resistencias	57
Tabla 5. Resumen de estimaciones y probabilidades para R1	61
Tabla 6. Resumen de estimaciones y probabilidades para R3.....	63
Tabla 7. Resumen de estimaciones y probabilidades para R7.....	65
Tabla 8. Resumen de estimaciones y probabilidades para R28.....	67
Tabla 9. Límites y nivel típico del LFS, MS y MA	70
Tabla 10. Evaluación de modelos para la relación R1 y R28	72
Tabla 11. Evaluación de modelos para la relación R3 y R28	73
Tabla 12. Evaluación de modelos para la relación R7 y R28	74
Tabla 13. Resumen modelo regresión polinómica R3 vs R28 sin intercepto	78
Tabla 14. Resumen de regresión modelo cuadrático sin intercepto	81
Tabla 15. Errores del modelo polinómico sin intercepto entre R7 y R28	85
Tabla 16. Parámetros y resultados del modelo para proporción con SED	90
Tabla 17. Parámetros y resultados del modelo para proporción con SES.....	91
Tabla 18. Parámetros y resultados del modelo para diferencias con SES	92
Tabla 19. Parámetros y resultados del modelo para diferencias con SED	93
Tabla 20. Comparación de modelos	93
Tabla 21. Errores del modelo.....	95
Tabla 22. Valores de referencia para la resistencia a 28 días	98

LISTA DE GRAFICOS

	pág.
Gráfico 1. Distribución de probabilidad normal.....	23
Gráfico 2. Comportamiento de la resistencia a la compresión	57
Gráfico 3. Grafico conjunto de las resistencias	58
Gráfico 4. Prueba de normalidad para la resistencia a 1 día	59
Gráfico 5. Resultados prueba de normalidad para la resistencia a 1 día, mediante el teorema del límite central.....	60
Gráfico 6. Capacidad de proceso según resistencia a 1 día	60
Gráfico 7. Prueba de normalidad para la resistencia a 3 día	62
Gráfico 8. Capacidad de proceso según resistencia a 3 días.....	62
Gráfico 9. Prueba de normalidad para la resistencia a 7 día.....	64
Gráfico 10. Capacidad de proceso resistencia a 7 día	64
Gráfico 11. Prueba de normalidad para la resistencia a 28 días	66
Gráfico 12. Capacidad de proceso resistencia a 28 día	66
Gráfico 13. Diagrama de dispersión R1 vs R28	72
Gráfico 14. Diagrama de dispersión R3 vs R28	73
Gráfico 15. Diagrama de dispersión R7 vs R28	74
Gráfico 16. Resumen de gráfico de residuos estándares.....	83
Gráfico 17. Prueba de igualdad de varianzas para R28.....	84
Gráfico 18. Primeras 100 observaciones de la resistencia para 2011	87
Gráfico 19. Proporción (R28/R1) para 20 observaciones de 2011	88
Gráfico 20. Diferencia (R28-R1) para 20 observaciones de 2011	88
Gráfico 21. Modelo de la diferencia por SES	94
Gráfico 22. Pronóstico de la Diferencia.....	96
Gráfico 23. Estimación de la resistencia a 28 días (R28)	96

Gráfico 24. Resistencia a la compresión con límites ideales de especificación99

Gráfico 25. Semáforo de alertas y alarmas para la resistencia a 28 días 100

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama del proceso de fabricación de Cemento.....	40
Figura 2. Diagrama del proceso de fabricación de Cemento.....	41
Figura 3. Molienda de crudo	44
Figura 4. Balsa	44
Figura 5. Esquema del horno.....	46
Figura 6. Rondas de golpes para comprimir	53
Figura 7. Línea de tiempo del ensayo de resistencia a la compresión	56
Figura 8. Variables que afectan la resistencia, dentro del proceso de molienda ...	68
Figura 9. Variables que influyen en la resistencia, dentro de la clinkerización	69

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Mina de Caliza	42
Imagen 2. Cargue de caliza	42
Imagen 3. Espesadores	45
Imagen 4. Molde para elaboración de cubos de mortero	50
Imagen 5. Agregar el cemento al recipiente con agua	51
Imagen 6. Recipiente y paleta en posición de mezcla.....	51
Imagen 7. Agregar la arena al recipiente	52
Imagen 8. Recipiente cubierto con trapo húmedo	52
Imagen 9. Primera capa de mortero en el molde	53
Imagen 10. Rondas de golpes para comprimir.....	53
Imagen 11. Segunda capa de mortero en el molde	54
Imagen 12. Retirar el exceso de mortero de la superficie	54
Imagen 13. Resumen modelo regresión logarítmica R1 vs R28	75
Imagen 14. Resumen modelo regresión polinómica R1 vs R28	76
Imagen 15. Resumen modelo regresión logarítmica R3 vs R28	77
Imagen 16. Resumen modelo regresión polinómica R3 vs R28	77
Imagen 17. Resumen modelo regresión logarítmica R7 vs R28	79
Imagen 18. Resumen modelo exponencial R7 vs R28.....	80
Imagen 19. Resumen modelo polinómico R7 vs R28.....	80

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Matriz de marco lógico	108
ANEXO B. Cronograma	112
ANEXO C. Manual de usuario	113
ANEXO D. Manual de Funcionamiento de la Herramienta	117

GLOSARIO

CEMENTO: es un material compuesto por Clinker, yeso y otras adiciones, con forma de polvo y color gris. Este material se endurece al ser mezclado con agua, y tiene diferentes tiempos de fraguado. Entre sus principales aplicaciones se encuentra la construcción de obras. Existen varios tipos de cemento, que varían con componentes y proporciones.

CEMENTO CONCRETERO: esta es una referencia de cemento específica que se produce en la empresa objeto de estudio, su composición y características son muy similares a las del cemento tipo III. Este es un cemento con mayor resistencia que el de uso general o tipo I, su color es blanco y es de venta exclusiva para clientes concreteros.

CEMENTO TIPO I: es el tipo de cemento de uso general y se elabora de acuerdo a las normas NTC 1362. Sus principales aplicaciones son los acabados generales, sellante entre uniones de piezas, fabricación de baldosas, entre otras. Su apariencia física muestra un color gris claro.

CEMENTO TIPO III: según la ficha técnica y la norma NTC 1362, este es un tipo de cemento que se caracteriza por el rápido desarrollo de las resistencias iniciales, altas resistencias, y color claro.

COEFICIENTE DE VARIACIÓN: indica la magnitud relativa de la desviación estándar S con respecto a la media \bar{X} . Es utilizada para contrastar dos o más variables que se encuentran en distintas escalas.

CONCRETO: es un compuesto que resulta de la mezcla de cemento, grava y arena, y es empleado en la construcción de obras y estructuras.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR: es una medida de la variabilidad que indica que tan separados están los datos con respecto a la media. Su notación es la letra S .

EFICACIA: según Gutiérrez y De La Vara (2009) es el grado en que se cumplen los resultados previstos.

EFICIENCIA: según Gutiérrez y De La Vara (2009) es la relación entre los recursos resultados obtenidos y los recursos empleados.

ESTADÍSTICO: es una variable aleatoria, y su valor depende de los elementos seleccionados de una muestra.

LIMITES REALES O NATURALES: indican los puntos entre los cuales varía la salida de un proceso. Por lo general estos límites son $\mu-3\sigma$ y $\mu+3\sigma$.

METODOLOGÍA: de acuerdo con la definición de la Real Academia de la Lengua Española la metodología hace referencia a un conjunto de métodos que deben seguirse en una investigación, o para lograr un objetivo.

RANGO: es la diferencia entre el dato mayor y el dato menor de una muestra de datos.

REDES NEURONALES ARITIFICIALES (ANN): son modelos computacionales usados para el reconocimiento de patrones en datos, predicción de valores, filtro de señales, entre otros, mediante la aplicación de conceptos biológicos de comportamiento neuronal llevados a sistemas tecnológicos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 TÍTULO

“Diseño de herramienta para la proyección y control de la resistencia a la compresión del cemento concretero con aplicación en una empresa cementera”

1.2 PROBLEMA

1.2.1 ANÁLISIS DEL PROBLEMA

El cemento debe cumplir con normas técnicas de calidad establecidas por ICONTEC, que especifican los parámetros mínimos a cumplir. Dichas especificaciones son rigurosamente verificadas y satisfechas en su totalidad en la empresa XYZ. El cemento concretero particularmente está regido por las normas NTC 121 y 321, sin embargo, han aparecido nuevas exigencias por parte del cliente, lo que ha creado nuevas necesidades de control.

El concreto es un material que varía debido a la falta de uniformidad de sus componentes y que al igual que el cemento, debe cumplir normas de calidad determinadas. Estas normas se centran principalmente en la resistencia, pues otras características del material están directamente ligadas con esta. Es por esto que los concreteros han trasladado estos requerimientos al cemento, pues es el único material de los que se compone que es fabricado, es decir, es el único que ha sido procesado con anterioridad.

Esta situación ha evidenciado la necesidad de diseñar una herramienta metodológica que permita determinar qué variabilidad puede ofrecer el cemento concretero a los concreteros, de acuerdo con su capacidad de proceso, con el objetivo de poder ofrecer niveles de resistencia que realmente se puedan cumplir.

Es importante aclarar que el cemento concretero entregado cumple perfectamente las especificaciones de la norma, por tanto, no hay producto no conforme. Sin embargo, específicamente con algunos clientes de alta demanda de cemento concretero, se ha presentado inconformidad con el producto, pues este ha presentado variaciones mayores, ofreciendo una confiabilidad menor al 95%.

1.2.2 FORMULACIÓN

Dadas las nuevas exigencias de compensación económica generadas por los clientes del cemento concreto a la empresa cementera XYZ al no cumplir la resistencia a 28 días con un Nivel de Servicio del 95% de las veces, esta empresa se ve en la necesidad de estimar en forma anticipada la resistencia a la compresión a 28 días con los datos de mediciones de resistencias tempranas, para ajustar los parámetros del proceso y así reaccionar rápidamente a una probable caída de esta variable.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Actualmente se presenta un elevado impacto económico en la empresa XYZ, asociado a los costos cobrados por los concreteros debido a las sobre dosificaciones en los diseños de concreto que estos deben realizar para contrarrestar la variabilidad de la resistencia del cemento adquirido. Por ejemplo, a partir de junio de 2011 la empresa XYZ ha tenido cobros por calidad cercanos a 800 millones de pesos. Las especificaciones de calidad pactadas con estos clientes es la ficha técnica de este cemento, sujeta a las normas técnicas ya mencionadas. Estas especificaciones se cumplen, sin embargo, el diseño de concretos está regido bajo la norma ASTM C 94-74 que especifica entre otros parámetros un porcentaje máximo de variabilidad del 10% en los ensayos de resistencia y una confiabilidad de los datos del 95%, la cual no se cumple, pues se ha presentado variación y algunas tendencias decrecientes en esta variable.

Estos elevados costos en parte son justificados por la toma de decisiones no oportuna, debido a la respuesta lenta que se tiene al manejar 28 días de espera para conocer el valor más importante de la resistencia a la compresión.

Por lo anterior, y dado que la empresa XYZ tiene un amplio conocimiento sobre su proceso y las acciones a tomar para corregir y ajustar sus variables de calidad, este proyecto busca crear una herramienta para ayudar en la toma de decisiones. Esta herramienta tiene como objetivo estimar el valor de la resistencia a la compresión a 28 días a partir de las resistencias tempranas, y al mismo tiempo generar señales de alerta y alarma ante estos valores estimados, que permitan a la empresa ajustar su reacción.

Este proyecto por tanto se fundamenta a partir del momento en que se toman las muestras del cemento, y por ende su impacto y eficiencia dependerá del mismo. Es decir, si las muestras de cemento son extraídas únicamente del cemento despachado, los resultados que arroje la herramienta servirán exclusivamente para corregir nuevos lotes de cemento que están en proceso, y no precisamente el lote que se estudia con la muestra tomada. Por otro lado, muestras tomadas a la

salida de la molienda y antes del almacenamiento en silos permitiría dado el caso realizar correcciones sobre el cemento antes de ser despachado.

Por consiguiente, la justificación de este proyecto va por tanto enfocada a la reducción de la incertidumbre que se tiene al desconocer una de las características de calidad más importantes del cemento, y a facilitar un ajuste en la reacción que tiene la empresa ante variaciones en la resistencia.

Finalmente, resulta importante aclarar, que el proyecto no logra eliminar los cobros por sobredosificaciones, pues para ello debería realizar correcciones sobre el producto terminado antes de ser despachado, y esto no lo puede garantizar el proyecto.

1.4 ALCANCE Y DELIMITACIÓN

Este proyecto busca diseñar una metodología de control enfocada a los ensayos de resistencia a la compresión a 28 días del cemento concretero, producido y despachado en una de las plantas de la empresa XYZ ubicada en el Valle del Cauca, basándose en las resistencias tempranas a 1, 3 y 7 días. Se aclara que el proyecto no busca definir y/o eliminar las causas de la variabilidad en la producción del cemento concretero, sino definir una metodología estadística que permita una toma de decisiones acertada.

Las variables que se analizarán serán exclusivamente las resistencias tempranas, es decir, la resistencia a la compresión a 1, 3 y 7 días, excluyendo entonces las materias primas de este análisis.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con la competitividad de la empresa XYZ, mediante el diseño de una herramienta de control para la resistencia a la compresión de 28 días en el cemento concretero.

2.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

Diseñar una herramienta que permita estimar la resistencia a la compresión a 28 días del cemento concretero, producido por la empresa XYZ, y que logre indicar los momentos de alarma y alerta ante una estimación no adecuada de dicha resistencia.

2.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar el proceso y analizar las variables y los parámetros que influyen en la resistencia a la compresión a 28 días del cemento concretero.
- Diseñar la metodología para proyectar de manera anticipada la resistencia a 28 días a partir de las mediciones más recientes de las resistencias tempranas.
- Diseñar la metodología para identificar las acciones a tomar, para ajustar los parámetros del proceso y así reaccionar rápidamente a una probable caída de la resistencia a 28 días.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 ANTECEDENTES

Tanto el cemento como el concreto son elementos sometidos a diferentes pruebas físicas, para asegurar parámetros de calidad requeridos y determinados por las normas técnicas. Entre estas propiedades físicas se analiza la resistencia a la compresión, cuya validación consiste en ensayos en diferentes periodos de tiempo, generalmente: 1, 3, 7 y 28 días. De estos ensayos de resistencia a la compresión el más importante es el de 28 días, pues a partir de este valor es que se diseñan las estructuras, dado que el valor de la resistencia no cambia significativamente. Este lapso temporal que debe transcurrir para conocer el mejor valor de la resistencia a la compresión es precisamente una de las principales preocupaciones en cuanto al control de esta característica de calidad.

Por lo anterior y especialmente para concretos, se han propuesto herramientas que permitan la predicción de estas propiedades físicas. Algunas de estas herramientas son las redes neuronales artificiales (ANN) y las ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Interface System). Estas herramientas requieren una previa determinación de las variables que se analizarán y que se incluirán en el modelo y el desarrollo de una amplia base de datos.

Nath, Goyal y Nath ¹(2011), desarrollaron estudios en estas áreas, expuestas en el artículo científico *“Prediction of compressive strength of concrete using neural network”*. Esta investigación plantea un modelo a partir de las ANN para predecir la resistencia a la compresión del concreto a 28 días, tomando como parámetros cuatro factores: contenido de cemento, contenido de agregado grueso, contenido de agregado fino y el módulo de finura de la arena. Este estudio evidencia la relación casi proporcional entre la resistencia a la compresión del concreto y el contenido del cemento en un nivel de agua constante y la aplicabilidad de herramientas como las ANN y ANFIS en la predicción de características físicas.

Folino, y otros autores² (2007), publican el artículo científico: *“Uso de redes neuronales y ANFIS para predecir la resistencia uniaxial a compresión de hormigones de alta resistencia”*. En esta investigación se predice la resistencia del

¹ International journal of emerging trends in engineering and development: Prediction of compressive strength of concrete using neural network. Agosto, 2011, vol. 1, no 1. ISSN 2249-6149.

² Asociación Argentina de Mecánica Computacional: Uso de redes neuronales y ANFIS para predecir la resistencia uniaxial a compresión de hormigones de alta resistencia. Argentina. Octubre, 2007. ISSN 1413-1426.

concreto a partir de nueve variables: contenido de cemento, sílice, cenizas volantes, agua, súper plastificante, agregado grueso, agregado fino, tamaño máximo de agregado grueso y tipo de agregado grueso. Los errores del modelo fueron aceptables al presentar valores menores a los obtenidos en los ensayos de resistencia, concluyendo que tanto las ANN como las ANFIS pueden ser empleadas para predecir la resistencia.

En la empresa XYZ, se tienen pocos antecedentes en lo que respecta a la estimación de parámetros estadísticos, sin embargo, para el año 2001 se realizó un proyecto que pronosticaba la resistencia a 28 días a partir de los componentes básicos del cemento y algunas propiedades físicas del mismo. Este proyecto titulado "*Predicción de la resistencia a la compresión del cemento a 28 días utilizando redes neuronales artificiales*"³, se realizó particularmente para el cemento tipo I que se produce en la empresa XYZ, a partir de los siguientes componentes químicos y características físicas del cemento: (CaO) óxido de calcio, (SiO₂) dióxido de sílice, (Al₂O₃) óxido de aluminio, (Fe₂O₃) trióxido de hierro, (SO₃) óxido de azufre, (MgO) óxido de magnesio, (Na₂O) óxido de sodio, (K₂O) óxido de potasio, (PI) pérdidas ígneas, cal libre, blaine, retenido de la malla R-325.

Como resultado del proyecto se presentó un modelo de predicción que con una confiabilidad del 90% aseguraba un error límite de 6,2%. Sin embargo, su aplicación presentó varias limitaciones: el modelo se desactualizaba rápidamente, pues cualquier variación en la proporción de las materias primas implicaba correr de nuevo el modelo y además, requería de personal con alto conocimiento en ANN. Estas dificultades imposibilitaron continuar con la aplicación de estos resultados y con la replicación de los mismos en otras plantas.

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 Calidad

Según Gutiérrez y De La Vara⁴ (2009), se entiende por calidad la capacidad que se tiene de cumplir o superar los requerimientos o expectativas que presenta un cliente frente al servicio o producto que se brinda. La calidad se determina

³ QUINTERO, Fredy A. y JIMENEZ Diego, F. Predicción de la resistencia a la compresión del cemento a 28 días utilizando redes neuronales artificiales. Tesis maestría en ingeniería de sistemas. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 2001.

⁴ GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Conceptos básicos de calidad. En: Control estadístico de calidad y seis sigma. 2 ed. México: Pablo Roig y Ana Delgado, 2009. P 2 - 13.

mediante cuatro grandes aspectos: la competitividad, que se entiende como la capacidad que se tiene para generar valor al cliente y comprende la calidad del producto, del servicio y del precio. La productividad es el segundo aspecto que determina la calidad e indica la relación entre lo que se produce y los recursos utilizados para ello, y se divide en eficiencia y eficacia. El tercer aspecto es la variabilidad, que indica la diversidad de resultados de una variable, esta diversidad se debe a seis elementos (las 6M): materiales, mano de obra, mediciones, medio ambiente, máquinas y métodos. El último aspecto que determina la calidad es la mejora, compuesta por acciones correctivas y preventivas.

De acuerdo a Montgomery⁵ (1991), para lograr un análisis de problemas de calidad se debe analizar el proceso implicado en función de las materias primas, las entradas controlables y las incontrolables. Las entradas incontrolables son por ejemplo la calidad de las materias primas y las controlables, son factores como la temperatura y la presión. Durante el proceso, se transforman las entradas en un producto que posee diferentes parámetros que definen su calidad. Es por esta transformación que resulta importante realizar experimentos en los que se alteren sistemáticamente los factores controlables y se estudie el efecto que tienen dichas variaciones en los parámetros del producto o salida del proceso.

Posterior al análisis del proceso y a la elaboración de la lista de variables que afectan la salida del proceso, se debe modelar la relación entre las variables de entrada y las características de la salida, mediante herramientas como el diseño de experimentos y la regresión. Finalmente, se deben elaborar diagramas de control que permitan detectar cuando se requieren cambios en dichas entradas.

3.2.1.1. Capacidad o habilidad de un proceso

Conocer la capacidad o habilidad de un proceso es una de las principales tareas a la hora de realizar un control de calidad. De acuerdo con Gutiérrez y De La Vara⁶ (2009) esta tarea consiste en conocer la amplitud de la variación natural del proceso para una característica de calidad dada. La capacidad de proceso es entonces una medida que permite saber hasta que punto una determinada característica de calidad es satisfactoria.

Para determinar la capacidad de proceso se requiere hacer una recolección de datos del proceso, a los que se le aplican técnicas estadísticas descriptivas, que buscan analizar y representar los datos, permitiendo entender su comportamiento.

⁵ MONTGOMERY, Douglas. El aseguramiento de la calidad en el entorno moderno de la administración. En: Control estadístico de la calidad. México: Nicolás Grepe, 1991. p. 1 - 16.

⁶ GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Conceptos básicos de calidad. En: Control estadístico de calidad y seis sigma. 2 ed. México: Mc Graw Hill, 2009. P 2 - 13.

De acuerdo a Hensen y Ghare⁷ (1990) la capacidad de proceso es la variación natural del proceso, y la tolerancia y las especificaciones que afectan la producción. Por esto la capacidad de proceso es definida por estos autores como seis veces la desviación estándar (6σ) de los datos a analizar, que deben en lo posible ser más de 100.

3.2.1.2 Medidas de tendencia central

Según Levine, Krehbiel y Berenson⁸ (2006), las medidas de tendencia central son métodos de medición que describen cómo todos los valores de los datos se agrupan en torno a un valor central. Algunas medidas de la tendencia central son la media, la mediana o percentil 50 y la moda.

La *media muestral* \bar{X} es el promedio de todos los datos de la muestra, y su ecuación para el cálculo es la siguiente:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Ec. 3.1}$$

donde n es el tamaño de la muestra, o el numero de datos con que se cuenta.

La *mediana o percentil 50* es el valor central de los datos en un arreglo ordenado de los mismos. Para el cálculo de la mediana se debe primero ordenar los datos, para proceder a tomar como mediana el valor en la posición $n/2$. De ser n un número par se toman los dos valores centrales y se promedian.

La *moda* es por su parte, el número con mayor frecuencia en los datos, es decir, quien se repite la mayor cantidad de veces dentro del arreglo de datos.

Estas medidas nos indican la tendencia central de las variables en estudio, sin embargo, estas son insuficientes como criterio de calidad, pues se la variación de los datos es un aspecto muy importante para esta.

3.2.1.2 Estimación por intervalo

Cuando se trabaja con variables continuas lo recomendable es expresar los estimadores, como lo son las medidas de tendencia central, en forma de intervalos, con el objetivo de poder asignarle una confiabilidad a dicho valor. Por

⁷ HANSEN, Bertrand L. y GHARE Prabhakar M. Análisis de la capacidad de proceso. En: Control de calidad: teoría y aplicaciones. Madrid: Juan Bravo, 1990. p. 199.

⁸ LEVINE, David M.; KREHBIEL, Timothy, C. y BERENSON, Mark L. Medidas numéricas descriptivas. En: Estadística para administración. 4 ed. México: 2006. p. 72 -118

tanto, el intervalo de confianza busca determinar qué tan precisa es una estimación puntual, indicando un rango en donde puede estar el parámetro con un determinado nivel de confianza o seguridad.

Esta estimación consiste en construir un intervalo con una confiabilidad de $(1-\alpha)$ 100% para un parámetro desconocido θ . Se debe entonces determinar dos valores L y U, que son los límites del intervalo [L, U], de tal forma que la probabilidad de que θ esté entre L y U sea del $(1-\alpha)$ 100%, que en notación es equivalente a: $P(L \leq \theta \leq U) = 1-\alpha$.

3.2.1.3 Medidas de dispersión y variabilidad

La variabilidad se refiere a la diversidad de resultados que puede obtener un proceso o una variable. La variabilidad es consecuencia de la interacción de materiales, mano de obra, mediciones, entorno, maquinaria y métodos en un proceso.

De acuerdo con Levine, Krehbiel y Berenson⁹ (2006), las medidas de dispersión o variabilidad son medidas que permiten determinar qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. Estas medidas son el complemento para las medidas de tendencia central, algunas de estas medidas son: la desviación estándar, el rango, el coeficiente de confiabilidad y los límites reales o neutrales.

La desviación estándar muestral σ indica que tan separados se encuentran los datos con respecto a la muestra, su ecuación de cálculo es la siguiente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n}} \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde \bar{X} es la media de los datos, n es la cantidad de datos, o tamaño de muestra, X_i es el dato número i.

El *rango* es la diferencia entre el dato mayor y el dato menor.

El *coeficiente de variación (CV)* es una medida que indica la magnitud relativa de la desviación estándar en relación con la media o promedio. Esta medida permite comparar la variación entre variables diferentes. Su ecuación de cálculo es:

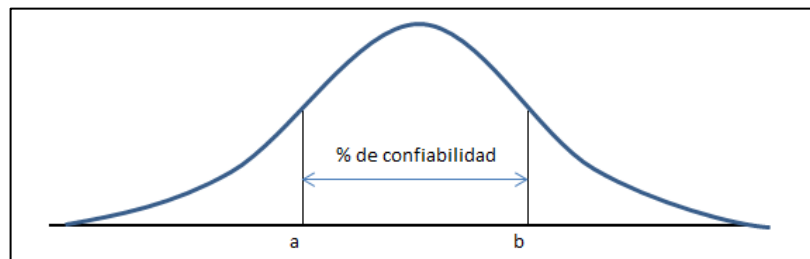
$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% \quad \text{Ec. 3.3}$$

⁹ Ibid., p. 72 – 118.

La desigualdad de Chebyshev, plantea una relación entre la media y la desviación estándar, en la que afirma que al menos $(1 - 1/k^2) \times 100\%$ de los datos están dentro de k desviaciones estándar a partir de la media, esta relación es equivalente a escribir: $\bar{X} - kS$ y $\bar{X} + kS$.

Los límites de probabilidad se utilizan cuando se cuenta con datos que se distribuyen de forma normal. Estos límites buscan establecer dos valores a y b tal que un porcentaje específico de los datos se encuentre contenido entre ellos. Ver gráfico 1.

Gráfico 1. Distribución de probabilidad normal



Fuente: La Autora

Para calcular este porcentaje o confiabilidad con la que los datos se encuentran en este intervalo, se recurre a la probabilidad. Este porcentaje es igual a la probabilidad con la que el valor de la variable se encuentra entre a y b :

$$P(a < X < b) = \text{confiabilidad} = P \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$P(a < X < b) = P(X < b) - P(X < a) \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$\text{Sea } Z = (\mu - \bar{x}) / \sigma \quad \text{Ec. 3.6}$$

$$\text{Y } P(X < b) = P(Zb) \quad \text{Ec. 3.7}$$

$$P(X < a) = P(Za)$$

Se obtiene entonces por medio de la función distribución normal estándar invertida el valor de Z con el que se obtienen los intervalos:

$$\bar{X} - Z\sigma \text{ y } \bar{X} + Z\sigma$$

3.2.1.4 Distribución de probabilidad

Cuando se toma una muestra de un universo se busca analizar los datos de dicha muestra para lograr un mejor conocimiento del universo. Por esto, es importante

determinar la distribución de probabilidad de dichos datos, que muestra el comportamiento de dicha variable, y permite estimar probabilidades de ocurrencia de que dicha variable tome un valor determinado.

Cada variable o característica de calidad puede tener asociada una distribución de probabilidad diferente. Para variables continuas se tienen distribuciones normales, exponenciales, uniformes, weibull, y triangulares. Para variables discretas se emplean comúnmente las distribuciones de Bernoulli, Uniforme y Geométrica.

Comúnmente, en la industria se manejan variables de tipo continuo, y aplicando pruebas de normalidad y el teorema del límite central, muchas de estas características de calidad en la industria siguen un comportamiento normal.

3.2.1.5 Inferencia estadística

Es la encargada de determinar las características de una población o proceso a partir del análisis de una muestra. La inferencia se apoya en estadísticos que se determinan con relación a la muestra y son una medida que ayuda a caracterizar la distribución de dicha muestra.

La inferencia estadística plantea estimaciones puntuales que son parámetros estadísticos que generan un valor numérico simple (ej. media y varianza), y estimaciones por intervalo, que se utilizan cuando se desea tener mayor certidumbre sobre el verdadero valor de parámetro poblacional de interés.

3.2.1.6 Prueba de hipótesis

Una prueba de hipótesis, según Levine, Krehbiel y Berenson¹⁰, es una metodología estadística que busca determinar que tan probable es que una hipótesis nula (H_0) sea cierta, considerando la información recabada en una muestra. Esta metodología inferencial se basa en la evidencia de la muestra para validar si ésta respalda mejor el enunciado de la hipótesis nula (H_0) o de la alternativa (H_a) mutuamente excluyente.

En una prueba de hipótesis se debe establecer la hipótesis nula, que es lo que se busca demostrar, y la hipótesis alternativa que es la opción mutuamente excluyente de la hipótesis nula.

El criterio de decisión en la prueba de hipótesis se puede realizar por medio del valor p , que es representa la probabilidad de conseguir un estadístico de prueba

¹⁰ LEVINE, David M.; KREHBIEL, Timothy, C. y BERENSON, Mark L. Fundamentos de las pruebas de hipótesis. En: Estadística para administración. 4 ed. México: 2006. p. 272 – 310.

igual o mas extremo que el resultado de la muestra, dado que la hipótesis nula sea cierta. Para afirmar que no existe evidencia que la hipótesis nula no sea cierta el valor p debe ser mayor al nivel de significancia α .

Resulta importante clara que otros autores, como Feldman¹¹, mencionan que aunque con un valor p mayor al nivel de significancia indica que la hipótesis nula no se rechaza, valores mas altos para el valor p muestran una mejor calidad de ajuste, y por tanto mayor certeza sobre el no rechazo de la hipótesis nula. Por tanto, comparar el valor p con el valor de significancia sólo cumple con el mínimo esperado del ajuste de la prueba de hipótesis.

Las pruebas de hipótesis tienen gran aplicación en las pruebas de normalidad de las variables y en general en las pruebas de ajuste a diferentes distribuciones.

3.2.1.7 Confiabilidad

El termino confiabilidad según definición de la Real Academia de la Lengua Española, es la probabilidad del buen funcionamiento de algo. Se encuentran como sinónimos a confiabilidad: exactitud, estabilidad, predictibilidad, seguridad. Por lo anterior, se puede establecer la confiabilidad como el grado de homogeneidad de los resultados de una variable y existen diversas formas para determinarla.

La confiabilidad puede ser calculada como la diferencia entre 1 y la proporción del error de la varianza con respecto a la varianza total.

La confiabilidad además, puede determinarse a partir del error estándar, el cual está en función de la distribución estándar de los resultados y del coeficiente de confiabilidad.

3.2.1.8 Cartas de pre-control

De acuerdo con Gutiérrez y De La Vara¹², las cartas de pre-control son una técnica de control empleada en variables continuas con doble especificación, con

¹¹ FELDMAN, Richard, M. y VALDEZ-FLORES, Ciriaco. Fitting distributions. En: Applied Probability and Stochastic Processes. 2 ed. Estados unidos: 1995. p. 90 – 98.

¹² GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Cartas de control para variables. En: Control estadístico de calidad y seis sigma. 2 ed. México: Pablo Roig y Ana Delgado, 2009. P 208 - 210.

el objetivo de prevenir la ocurrencia de defectos en procesos. Esta técnica supone que el proceso tiene como máximo la amplitud de las especificaciones, y que la media del proceso está centrada en el valor objetivo.

La carta de pre control es una herramienta que permite mantener la media del proceso dentro de los niveles adecuados y controlar la variabilidad del proceso. Esta herramienta es útil solamente cuando se tienen variables de ajuste previamente identificadas, que permitan ajustar el proceso a su estado original o ideal.

Esta herramienta consiste en un semáforo contra el cual se comparan los valores medidos de la variable. Las zonas de operación del semáforo se calculan al dividir la tolerancia o rango de especificaciones en cuatro partes iguales. De estas cuatro partes, las dos partes centrales constituyen la zona verde del semáforo, que indican un proceso en control, las dos partes de los extremos constituyen la zona amarilla del semáforo, indicando un aviso de que algo puede estar mal, y fuera de las especificaciones se encuentra la zona roja, que indica alarma: proceso fuera de especificaciones.

3.2.2 Métodos de proyección, estimación y pronóstico de variables

Existen muchos métodos para proyectar, estimar o pronosticar una variable, y estos se emplean dependiendo de las características de la variable que se esté trabajando. Entre estos métodos se encuentran los modelos de regresión, los pronósticos de series de tiempo, las redes neuronales, el análisis de componentes principales, entre otros.

3.2.2.1 Regresión

Según Levine, Krehbiel y Berenson¹³ (2006) el análisis de regresión es una técnica que permite generar modelos para predecir una variable dependiente a partir de otra u otras variables independientes.

Dentro del análisis de regresión se estudian las regresiones lineales, polinómicas, exponenciales, logarítmicas, etc. Todas para poder establecer modelos con validez estadística deben cumplir una serie de supuestos que se mencionan a continuación.

¹³ LEVINE, David M.; KREHBIEL, Timothy, C. y BERENSON, Mark L. Regresión lineal simple. En: Estadística para administración. 4 ed. México: 2006. p. 409 – 464.

Normalidad: los modelos de regresión requieren que los errores o residuos (diferencia entre el valor real de la variable y el estimado por el modelo) se distribuyan normalmente.

Igualdad de varianzas (homoscedasticidad): se debe cumplir que la varianza de los errores sea constante para todos los valores de la variable.

Aleatoriedad e independencia de errores: estos modelos requieren que los residuos sean independientes unos de otros. Este supuesto se verifica con el fin de descartar que los errores se correlacionen con los de un periodo previo.

Linealidad: se emplea cuando se realizan modelos netamente lineales, y busca demostrar que la relación entre las variables es lineal.

Multicolinealidad: se emplea para modelos de regresión múltiple. Busca asegurar que no exista colinealidad entre las variables, es decir que las variables predictores sean independientes entre si.

Además, para la regresión se debe calcular el coeficiente de determinación (R cuadrado) que es quien indica que porcentaje de la variación de la variable dependiente (Y) se explica por la variación de la(s) variable(s) independiente(s) (X1, X2, ...) Este indicador se calcula mediante el cociente entre la suma de los cuadrados de la regresión (SSR) y la suma total de los cuadrados (SST).

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad \text{Ec. 3.9}$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad \text{Ec. 3.10}$$

En las ecuaciones descritas, la notación \hat{Y} indica el estimado de Y, y \bar{Y} indica el promedio de la Y. Los valores adecuados para R cuadrado (coeficiente de determinación) son aquellos que sean mayores a 0.8, pues indican que la variable Y se explica en un 80% ó más por la(s) variable(s) independientes empleadas en el modelo.

3.2.2.2 Pronósticos

Los pronósticos son herramientas que permiten estimar el valor futuro de una variable con base en el comportamiento histórico y las relaciones con otras

variables. La determinación del método de pronóstico a emplear depende del comportamiento de la variable que se analice. Un pronóstico debe ir siempre acompañado de una medida del error.

Para poder aplicar los métodos de pronósticos se debe contar con variables que se comporten como series de tiempo. Tal como explican Sipper y Bulfin, una serie de datos “es una lista cronológica de datos, para la que la suposición esencial es que la historia predice el futuro de manera razonable”¹⁴.

Existen tres condiciones que debe cumplir una variable para afirmar que esta se comporta como una serie de tiempo:

1. La base de tiempo debe ser única
Se maneja a lo largo de la serie un mismo periodo de tiempo.
2. La serie de tiempo debe ser consecutiva
Para cada periodo debe conocerse el valor de la variable.
3. Cualquier dato de la serie se debe explicar por el comportamiento de los datos anteriores de la serie.

A continuación y según Sipper y Bulfin¹⁵, se mencionan tres métodos de pronósticos que se emplean de acuerdo al comportamiento de la variable.

3.2.2.2.1 Suavizamiento exponencial simple

Esté es un método empleado para variables estacionarias, es decir que no presentan ni tendencia ni estacionalidad. El modelo planteado es el siguiente:

$$S_t = \alpha D_t + (1 - \alpha)S_{t-1} \quad \text{Ec. 3.11}$$

S_t = Nuevo Pronóstico
 D_t = Observación de la demanda
 S_{t-1} = Último Pronóstico

La ecuación anterior de S_t representa una ponderación entre el valor actual de la variable (D_t) y el ultimo pronóstico realizado. Por tanto el pronóstico para el siguiente periodo será:

$$\begin{aligned} F_{t+1} &= S_t \\ F_{t+\tau} &= F_{t+1} = S_t \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.12}$$

¹⁴ SIPPEN, Daniel y BULFIN, Robert, L. Pronósticos. En: Planeación y control de la producción. 2 ed. México: Marcia González Osuna y Silvana Hernández García, 1998. P 122.

¹⁵ Ibid., p. 127

Este método es por tanto el promedio ponderado del último pronóstico y el valor actual de la variable:

$$F_t = \alpha D_{t-1} + (1 - \alpha)F_{t-1} \quad \text{Ec. 3.13}$$

Donde α : Constante de suavizamiento y su valor está entre: $0 < \alpha \leq 1$
 Con el objetivo de aclarar el significado de la ecuación anterior, se presenta el siguiente análisis:

$$\begin{aligned} F_t &= \alpha D_{t-1} + (1 - \alpha)F_{t-1} \\ F_t &= \alpha D_{t-1} + F_{t-1} - \alpha F_{t-1} \\ F_t &= F_{t-1} - \alpha(F_{t-1} - D_{t-1}) \\ F_t &= F_{t-1} - \alpha(e_{t-1}) \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Interpretación: el pronóstico en cualquier periodo t es el pronóstico en el periodo t-1 menos cierta fracción (α) de error de pronóstico observado en periodo t-1

Este modelo genera el siguiente amortiguamiento: si pronosticamos alto en el periodo t-1 (F_{t-1} alto), el error es positivo ($F_{t-1} - D_{t-1}$) y el ajuste consiste en disminuir el pronóstico. Así mismo, si el pronósticos es alto en el periodo t-1 (F_{t-1} bajo), el error es negativo ($F_{t-1} - D_{t-1}$) y el ajuste es incrementar el pronóstico actual.

Continuando el análisis de este modelo se presenta:

$$\begin{aligned} F_t &= \alpha D_{t-1} + (1 - \alpha)F_{t-1} \\ F_{t-1} &= \alpha D_{t-2} + (1 - \alpha)F_{t-2} \\ F_{t-2} &= \alpha D_{t-3} + (1 - \alpha)F_{t-3} \end{aligned}$$

Remplazando F_{t-1} y F_{t-2} en F_t se tiene

$$\begin{aligned} F_t &= \alpha D_{t-1} + (1 - \alpha)[\alpha D_{t-2} + (1 - \alpha)F_{t-2}] \\ F_t &= \alpha D_{t-1} + \alpha(1 - \alpha)D_{t-2} + (1 - \alpha)^2 F_{t-2} \\ F_t &= \alpha D_{t-1} + \alpha(1 - \alpha)D_{t-2} + (1 - \alpha)^2 [\alpha D_{t-3} + (1 - \alpha)F_{t-3}] \\ F_t &= \alpha D_{t-1} + \alpha(1 - \alpha)D_{t-2} + \alpha(1 - \alpha)^2 D_{t-3} + (1 - \alpha)^3 F_{t-3} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Donde se obtiene la serie infinita

$$\begin{aligned} F_t &= \sum_{i=0}^{\infty} \alpha(1-\alpha)^i D_{t-i-1} \\ F_t &= \sum_{i=0}^{\infty} a_i D_{t-i-1} \end{aligned}$$

Ponderaciones a_i

Los pesos son $a_0 > a_1 > a_2 \dots > a_i = \alpha(1 - \alpha)^i$

$$\sum_{i=1}^{\infty} a_i = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha(1 - \alpha)^i = \alpha \sum_{i=0}^{\infty} (1 - \alpha)^i = \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha)} = 1 \quad \text{Ec. 3.15}$$

El suavizamiento exponencial aplica un conjunto de ponderaciones decrecientes a todos los datos pasados.

Se puede ajustar la curva exponencial continua $g(i) = \alpha \exp(-\alpha i)$ a estas ponderaciones, razón por la cual el método se denomina suavizamiento exponencial.

3.2.2.2 Suavizamiento exponencial doble (Método de Holt)

Este método se emplea en variables (demandas generalmente) cuyo comportamiento presenta un componente de tendencia. Aquí se emplean dos constantes de suavizamiento (α y β) y utiliza dos ecuaciones de suavizamiento:

1. Para el valor de la serie (la intercepción)
2. Para la tendencia (la pendiente)

Para el pronóstico de τ pasos adelante, hecho en el periodo t ($F_t, t + \tau$):

$$S_t = \alpha D_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + G_{t-1}) \quad \text{Ec. 3.16}$$

$$G_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta) G_{t-1} \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$F_t, t + \tau = S_t + G_t \quad \text{Ec. 3.18}$$

S_t : Valor de la intercepción en el tiempo t , y se halla promediando la demanda en t (D_t) con el pronóstico previo de la demanda actual, que es la intercepción previa S_{t-1} mas una vez la pendiente previa G_{t-1}

G_t : Valor de la pendiente en el tiempo t . nuestro nuevo estimado de intercepción S_t provoca que modifiquemos nuestro estimado de pendiente en la cantidad: $S_t - S_{t-1}$

Este modelo requiere el siguiente proceso de inicialización:

S_0 y G_0 se pueden hallar de dos formas

1. Regresión: $y = a + bx$ Ec. 3.19
 $D_t = S_0 + G_0 t$

2. Modelo con estaciones

- i. Tomar los datos y dividirlos en m estaciones con N datos c/u
 Ej. con 6 datos → m: 3 estaciones n: 2 datos c/u ó m: 2 estaciones n: 3 datos c/u
- ii. A cada estación le hallo el promedio V_i
- iii. Hallo los parámetros

$$G_0 = \frac{V_m - V_1}{(m - 1)N} \quad \text{Ec. 3.20}$$

$$S_0 = V_1 - \left[G_0 \left(\frac{N+1}{2} \right) \right] \quad \text{ó} \quad S_0 = \bar{D} + \left(\frac{N-1}{2} \right) G_0 \quad \text{Ec. 3.21}$$

Análisis de la constante de suavizamiento (α):

- Si α es grande → Se realiza mayor ponderación a la observación actual de la demanda y menos ponderación sobre las demandas pasadas. Esto da como resultado pronósticos que reaccionan rápidamente a los cambios en los patrones de demanda pero pueden tener mucha mayor variación de periodo a periodo.
- Si α es pequeña → Se asigna mayor peso en los datos pasados y los pronósticos son mas estables.

Para pronósticos estables: $0.1 \leq \alpha \leq 0.3$

Pronóstico inicial del modelo:

Debido a que el suavizamiento exponencial (SE) requiere que en cada etapa tengamos un pronóstico previo, el pronóstico inicial debe ser:

- Pronóstico inicial = valor inicial de la demanda $F_1 = D_1$
- Pronóstico inicial = promedio asimétrico de la demanda

3.2.2.2.3 Suavizamiento exponencial triple (Método de Holt - Winters)

Este método de pronóstico se utiliza para variables que presentan cambios estacionales, es decir que presentan patrones que se repiten en el tiempo.


Conforme se dispone de nuevos datos, se pueden actualizar las estimaciones con suavizamiento exponencial. Los coeficientes para el término constante, la tendencia y los factores estacionales se denotan por α , β y γ , respectivamente

Dados S_{T-1} , B_{T-1} y C_{T-L+1} , $C_{T-L+2}, \dots, C_{T-1}$, o estimados por algún método de inicialización, cuando se conoce d_T se pueden determinar S_T , B_T y C_T que son los componentes del modelo Winters.

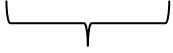
La Serie S_T

El nivel actual de la serie descentralizada S_T esta dado por

$$S_T = \alpha \left(\frac{D_T}{C_{T-L}} \right) + (1 - \alpha) (S_{T-1} + B_{T-1}) \quad \text{Ec. 3.22}$$



Ultima demanda
descentralizada



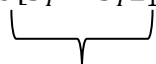
Ultima demanda
calculada

Cuando se divide D_T por el factor estacional apropiado, lo que se busca es descentralizar la observación de la demanda más nueva.


La última demanda desestacionalizada, se promedia entonces el pronóstico actual para la serie descentralizada ($S_{T-1} + G_{T-1}$)

La tendencia B_T

$$B_T = \beta [S_T - S_{T-1}] + (1 - \beta) G_{T-1} \quad \text{Ec. 3.23}$$




La nueva
pendiente




La última
tendencia

Los factores estacionales C_T

$$C_T = \gamma \left(\frac{d_T}{S_T} \right) + (1 - \gamma) C_{T-L} \quad \text{Ec. 3.24}$$



Es el nuevo
factor estacional



Último factor estacional
calculado, que es familiar de
él, es decir, del mismo
periodo de la estación anterior

La relación obtenida entre la observación de la demanda mas reciente (D_T) sobre el estado actual de la demanda desestacionalizada (S_T) da como resultado el estimado actual del factor estacional.

(D_T/S_T) Se promedia con el factor estacional previamente estimado $C_T = N$

3.2.2.3 Análisis de Componentes principales

Según Manuel Terradez¹⁶, el análisis de componentes principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción del número de variables. Tiene como objetivo reducir las variables a un menor número, perdiendo la menor cantidad de información.

Un ACP tiene sentido si existen altas correlaciones entre las variables, ya que esto es indicativo de que existe información redundante, y por tanto pocos factores explican gran parte de la variabilidad total.

Selección de factores:

Le ACP implica en primera instancia la selección de los factores principales, que consiste en seleccionar el primer factor o variable, de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variable original (R28); el segundo factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero y así sucesivamente.

Del total de factores se elegirán aquellos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente. A estos se les denominan componentes principales.

Análisis de la matriz factorial:

Esta matriz de análisis factorial consiste en la correlación entre las variables y los componentes principales previamente seleccionados. Para lo que se requiere que las correlaciones (coeficientes factoriales) sean próximos a 1, que cada variable tenga coeficiente elevado solo con un factor, y que no existan factores con coeficientes similares.

Puntuaciones factoriales

¹⁶ TERRADEZ, Manuel. Análisis de componentes principales [en línea]. [Citado el 3 de Marzo 2012]. Disponible en Internet: <http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf>

Para calcular las puntuaciones factoriales el ACP maneja la siguiente ecuación:

$$X_{ij} = a_{i1} \cdot z_{1j} + \dots + a_{ik} \cdot z_{kj}$$

Ec. 3.25

$$= \sum_{s=1}^k a_{is} \cdot z_{sk}$$

Donde a son los coeficientes, y Z son los valores estandarizados que tienen las variables en cada uno de los sujetos de la muestra.

3.2.2.4 Redes Neuronales

Según Daniel Graupe¹⁷, las redes neuronales artificiales (RNA) son redes computacionales que buscan simular las redes de células nerviosas (neuronas) del sistema nervioso central biológico (humano o animal). Las RNA permiten usar operaciones computacionales simples (sumar, restas, multiplicaciones o elementos de lógica) para resolver problemas complejos, no lineales o estocásticos.

De acuerdo con Larrañaga, Inza y Moujahid¹⁸ una neurona, dentro del concepto de RNA consiste en un conjunto de entradas, unos pesos sinápticos, una regla de propagación (definida a partir del conjunto de entradas y pesos sinápticos de la neurona), y una función de activación. La red neuronal en su arquitectura, esta compuesta por: una capa de entrada o capa sensorial, capa(s) oculta(s), y una capa de salida.

La capa de entrada esta compuesta por tantas neuronas como datos, señales o variables se tengan, precedentes del entorno. La capa oculta no tiene ninguna relación directa con el entorno, pero proporciona los grados de libertad a la red, permitiéndole representar fácilmente determinadas características del entorno. Pueden existir redes con una, dos o mas capas ocultas. La capa de salida proporciona la respuesta de la red neuronal.

Las redes neuronales requieren de la disposición de muchos datos conocidos para su formación. Esto se debe a que requieren una gran cantidad para su

¹⁷ GRAUPE, Daniel. Introduction and Role of Artificial Neural Networks. En: Artificial Neural Networks. 2 ed. Estados Unidos: World Scientific, 2007. P 1 - 4.

¹⁸LARRAÑAGA, Pedro; INZA, Iñaki; y MOUJAHID, Abdelmalik. Redes Neuronales. [Citado el: 1 de marzo 2012]. Disponible en Internet: <<http://es.scribd.com/doc/39352648/t8neuronales>>

entrenamiento, que es el proceso por el que la red aprende el comportamiento del sistema.

3.2.2.5 Evaluación de modelos

Existen diferentes medidas de exactitud de un pronóstico, que parten del cálculo del error que es la diferencia entre el valor pronosticado y el valor real de la variable para el mismo periodo. El error se calcula a partir de la siguiente expresión matemática:

$$e_t = F_t - D_t \quad \text{Ec. 3.26}$$

Donde F_t es el valor pronosticado de la variable D_t , usualmente identificada como demanda.

Algunas de estas medidas de la exactitud son el error medio (EM), la desviación absoluta media (DAM), el error cuadrático medio (ECM), el error porcentual absoluto medio (EPAM), y la desviación estándar del error.

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad \text{Ec. 3.27}$$

$$DAM = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n} \quad \text{Ec. 3.28}$$

$$ECM = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n} \quad \text{Ec. 3.29}$$

$$EPAM = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|e_i|}{D_t}}{n} \quad \text{Ec. 3.30}$$

Adicionalmente, se tiene un indicador que permite determinar cuándo un método deja de ser “confiable” para pronosticar una variable, llamado *señal de rastreo*. Este indicador busca determinar en que momento el método esta descontrolado, para lo que sería recomendable cambiar de método de pronóstico.

La señal de seguimiento, denotada por la letra ρ_T en el tiempo T esta dada por la siguiente expresión:

$$\rho_T = \frac{|E_T|}{\Delta_T} \quad \text{Ec. 3.31}$$

Donde Δ_T se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\Delta_T = \beta |e_{T-1}| + (1 - \beta) \Delta_{T-1} \quad \text{Ec. 3.32}$$

Donde β es una constante de suavizamiento, cuyo valor recomendado es 0,2. E_T , es el error acumulado que se expresa de la siguiente forma:

$$E_T = \sum_{i=1}^n e_i \quad \text{Ec. 3.33}$$

El valor crítico con el que se compara la señal de rastreo ρ_T se denota por η y sigue la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{K}{0.8} \sqrt{\frac{1}{2\alpha}} \quad \text{Ec. 3.34}$$

K representa el número adecuado de desviaciones estándar, que para un 95% de confianza adquiere el valor de 2. α es otra constante de suavizamiento cuyo valor recomendado es 0,05.

Por tanto, cuando la señal de rastreo ρ_T es menor o igual que el valor crítico η ($\rho_T < = \eta$) se dice que el modelo está controlado.

3.3 APOORTE INTELECTUAL

Para la estimación de los parámetros estadísticos de la resistencia a la compresión a 28 días se emplearon como base los conceptos de calidad, probabilidad e inferencia, aplicados sobre los registros históricos de esta variable. Dentro de los parámetros estadísticos se busca determinar el promedio, la variabilidad y los intervalos para esta variable, que pueden variar con el registro de nuevos datos.

Los temas de pronósticos son elementos fundamentales para lograr la proyección de la resistencia a la compresión del cemento concreto a 28 días, a partir de las resistencias tempranas (1, 3 y 7 días), teniendo en cuenta métodos de evaluación de pronósticos, como la señal de rastreo, con el objetivo de verificar los requerimientos de cambiar de método de proyección y de obtener resultados más confiables y precisos. Esta proyección de la resistencia permitirá anticiparse a los resultados corrigiendo los valores con menor tiempo de retraso posible.

Por tanto, en este proyecto, el aporte de la investigadora consistió en el diseño de una herramienta en Excel que tiene el objetivo de estimar la resistencia a la compresión del cemento concreto a 28 días a partir de las resistencias tempranas. Esto con el fin de generar niveles de alerta y alarma que cooperen en la toma de decisiones frente a las variaciones de la resistencia.

4. METODOLOGÍA

4.1 ETAPAS DEL TRABAJO

Se presenta la estrategia metodológica para el desarrollo del proyecto, compuesta por tres grandes etapas.

4.1.1 Caracterización del proceso y análisis de variables

En esta etapa se pretende conocer la relación entre las resistencias tempranas y la resistencia a 28 días, y las acciones de ajuste aplicadas en la empresa sobre factores físicos y de mezcla para corregir la resistencia.

Esta etapa implica: un reconocimiento y familiarización con las pruebas de resistencia y una recopilación de las acciones que se toman para ajustar los resultados no adecuados mediante visitas a la empresa. Posterior a estas primeras actividades, sigue la selección del método estadístico que permite estimar los parámetros.

4.1.2 Diseño de metodología para lograr ajuste en los resultados de las pruebas de resistencia

En esta etapa se pretende diseñar una herramienta en Excel, que permita a partir de la proyección de la resistencia a 28 días indicar los momentos de alerta y las acciones para ajustar la variable.

Para lograr este objetivo, se inicia con la determinación de los métodos de proyección más adecuados que estimen el valor de la resistencia a 28 días a partir de las resistencias tempranas de un mismo lote de cemento concreto. Posteriormente, se identificaron los niveles en que la herramienta indicará alerta. Por último, se establece la relación entre los niveles de alerta y las acciones de ajuste conocidas con anterioridad.

4.1.3 Diseñar la metodología para identificar los momentos de alerta y alarma

Esta metodología es un complemento de la herramienta de Excel que determina, mediante conceptos de pre-control, los momentos de alerta y alarma frente a los valores estimados de la resistencia a la compresión.

4.2 MARCO LÓGICO

La matriz de marco lógico contiene el desprendimiento de todas las actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos específicos del proyecto. En esta matriz se expone el resumen, indicadores, medios de verificación y supuestos de cada actividad. Ver Anexo A.

4.3 ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO

Para lograr los objetivos de este proyecto se deben analizar los recursos, tiempo y presupuesto requeridos para su adecuado desarrollo.

4.3.1 Recursos

Para el desarrollo de este proyecto se requieren los siguientes recursos financieros, físicos y humanos:

Recursos Financieros

Este proyecto requiere de recursos financieros para cubrir con los gastos de transporte, adquisición de textos, documentos de apoyo, copias e impresiones. Gastos que serán asumidos completamente por la estudiante responsable de este proyecto.

Recursos Físicos

- Computador: donde se diseñará la herramienta y se documentará el desarrollo y resultados del proyecto. Debe tener paquete completo de Microsoft Office y acceso a internet.
- Vehículo: medio de transporte para la responsable del proyecto.

Recursos Humanos

- Estudiante responsable del proyecto

- Tutor temático: docente encargada de guiar la realización del proyecto, en cuanto al área temática.
- Tutor metodológico: docente encargado de ofrecer asesoría en aspectos metodológicos en el desarrollo del proyecto.
- Lector: Persona encargada de realizar correcciones y aprobación del proyecto.
- Asesor encargado del proyecto en la empresa.

4.3.2 Cronograma

El cronograma del proyecto contiene las fechas aproximadas para cada una de las actividades que lo componen. Se estableció un calendario de 3 días de trabajo a la semana, cada uno con 5 horas de trabajo, además se configuró como excepción el periodo comprendido del 25 de noviembre al 13 de enero, en el que hay cinco días laborales a la semana. Ver Anexo B.

5. DESARROLLO DEL PROYECTO

5.1 CARACTERIZAR EL PROCESO Y ANALIZAR LAS VARIABLES Y PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A 28 DÍAS DEL CEMENTO CONCRETERO.

5.1.1 Proceso de fabricación del cemento

El cemento es un material compuesto por clinker, yeso y otras adiciones. Es clinker es por su parte es un material que en algunas plantas se importa y en otras se fabrica. Este proyecto se desarrolla en una planta que fabrica el clinker, por lo que cuenta también con una mina en donde se extrae y procesa la materia prima del clinker.

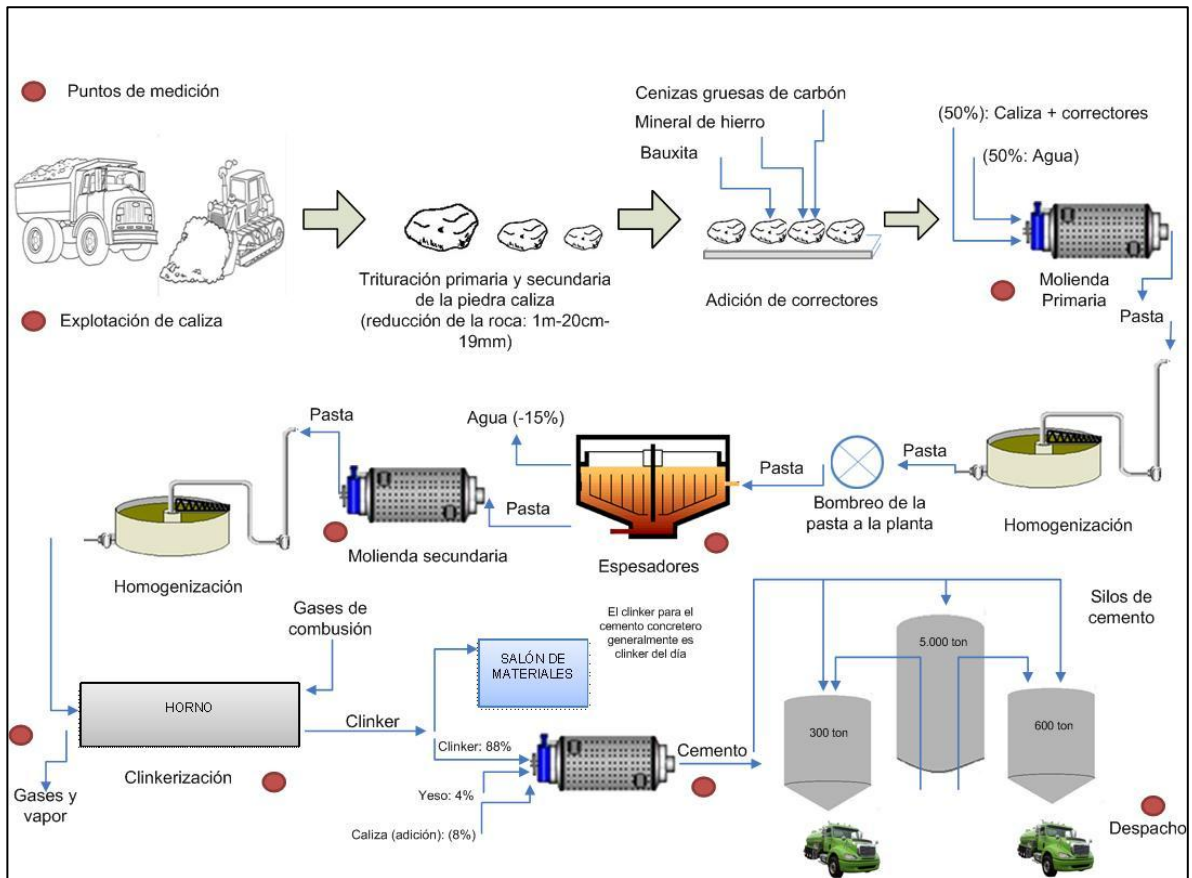
La materia prima del clinker es procesada y convertida en una pasta que es enviada mediante tubería a la planta, donde se termina de procesar y se elabora el cemento. En la figura 1 se muestra el diagrama del proceso de fabricación de cemento, y en la figura 2 se muestra el diagrama de flujo enriquecido.

Figura 1. Diagrama del proceso de fabricación de Cemento



Fuente: La Autora con información de la empresa objeto de estudio

Figura 2. Diagrama del proceso de fabricación de Cemento



Fuente: La Autora con información de la empresa objeto de estudio

A continuación se describe y explica cada uno de los procesos que implican la fabricación del cemento:

Procesos realizados en la mina:

De la mina se extrae la piedra caliza, que es una roca sedimentaria que contiene principalmente cal o carbonato de calcio (CaCO_3) y en menor proporción sílice, aluminio y hierro.

El carbonato de calcio CaCO_3 al ser sometido a altas temperaturas se convierte en óxido de calcio y permite la formación de las fases del clinker.

Antes de comenzar con la extracción de la materia prima, se realiza un estudio previo conocido como el planeamiento minero, que cuenta con las siguientes etapas, que hacen posible una óptima extracción:

1. Exploración

Consiste en la recolección de datos del subsuelo, y busca investigar el material que compone la mina, tanto en calidad como en cantidad. La exploración requiere por tanto extraer núcleos de roca, a lo largo de toda la mina, que son enviados al laboratorio para determinar su composición química y sus propiedades físicas. De esta forma se conoce la disposición de la materia prima con que se cuenta.

2. Calculo de reservas

De acuerdo a los resultados obtenidos en la exploración se consolida una base de datos y un modelo de recursos que permite identificar la mina por zonas de acuerdo a la calidad de la roca y programar la extracción de la misma.

3. Planeación

De acuerdo al estudio anterior se realiza un plan diario y mensual de cargue y transporte de la caliza, en donde se indica la cantidad de cargue, la zona, y la finalidad del material que se carga.

No toda la caliza sirve para fabricar clinker y por tanto hacer cemento; dependiendo del contenido de sílice y carbonato de calcio que presente la caliza esta se destina para convertirse en material de adición del cemento, descapote, o caliza de producción. La caliza apta para producción de cemento es aquella que contiene un porcentaje mayor al 70% en contenido de carbonato de calcio (CaCO_3).

Dentro de la planeación también se realiza el diseño de taludes, vías y botaderos, como se puede apreciar en la Imagen 1.

Una vez se tiene la planeación minera se procede con la primera etapa de la fabricación del cemento:

Extracción de caliza

Se realiza entonces la explotación, que en esta mina es a cielo abierto, de acuerdo a la planeación selectiva previamente mencionada. Esta extracción se efectúa mediante perforaciones o barrenos de 8 a 12 cm de diámetro y tiene una profundidad máxima de

Imagen 1. Mina de Caliza



Fuente: Empresa XYZ

Imagen 2. Cargue de caliza



Fuente: Empresa XYZ

10 metros; en cada perforación o “burden” se introducen los explosivos, seguidos de un efecto airbag obtenido mediante bolsas, para finalmente introducir el retacado.

En esta mina usualmente se realizan tres voladuras semanales.

De esta forma se logra obtener la caliza en rocas de máximo un metro cubico en una disposición que facilita su cargue. El cargue se hace en volquetas con capacidad de 46 toneladas.

Trituración primaria

Las volquetas cargadas depositan la caliza de producción en la trituradora primaria que es una quebrantadora de conos con capacidad de 600 ton/hora rediciendo rocas con longitud promedio de 1 metro a 20 cm.

De la trituradora primaria la caliza se ubica en un depósito intermedio.

Trituradora secundaria

Por un túnel ubicado debajo del depósito intermedio, se alimenta la caliza a una banda transportadora que la dirige a un zaranda vibratoria que separa las rocas mayores a 19 mm y las introduce en el “circuito cerrado” de la trituración secundaria. Después de pasar por la zaranda primaria las rocas mayores a 19 mm son dirigidas a la trituradora secundaria que las reduce a un tamaño máximo de 19 mm, y son enviadas a una segunda zaranda vibratoria que permite el paso de las rocas menores a 19 mm hacia el depósito final, y redirige las rocas con tamaño mayor a 19 mm de nuevo a la trituradora secundaria.

Adición de correctores

El depósito final consiste en una serie de montañas de material que se clasifica de acuerdo a su contenido de carbonato de calcio (CaCO_3), dióxido de sílice (SiO_2) y dióxido de aluminio (Al_2O_3).

De acuerdo a las falencias de cada material según se conoce en el depósito final, se aplican correctores: Bauxita como corrector de aluminio, como corrector de sílice se usan las cenizas gruesas del carbón provenientes de la planta de autogeneración, y como corrector de hierro se emplea el mineral de hierro.

- Bauxita
Es una roca sedimentaria compuesta principalmente por aluminio, y en menor proporción por hierro y sílice.
- Cenizas gruesas de carbón

Aporta en un 50% de sílice (SiO_2) y en un 30% óxido de aluminio (Al_2O_3).

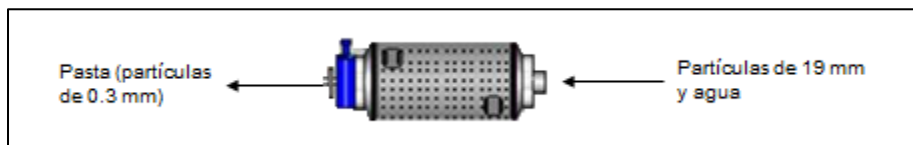
- Mineral de hierro

Por un túnel ubicado debajo del depósito final se van mezclando las calizas y los correctores de forma tal que se obtengan las proporciones adecuadas.

Molienda primaria

La molienda primaria también llamada molienda de crudo, consiste en introducir la caliza previamente corregida y agua en un 50% en un molino cilíndrico con cuerpos molidores esféricos de acero, de tal forma que las partículas de caliza se reduzcan de 19 mm a 0,3 mm de diámetro. Este proceso está representado en la figura 3.

Figura 3. Molienda de crudo

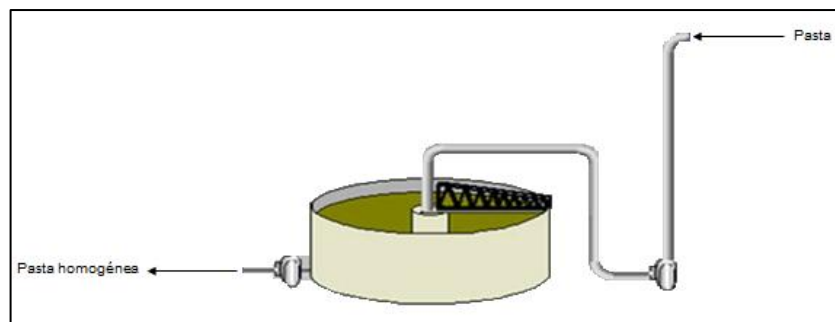


Fuente: La Autora

Homogenización y almacenamiento de la pasta

La pasta extraída del molino es dirigida a unas balsas que cumplen la función de homogenizar la pasta, tal como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Balsa



Fuente: La Autora

Bombeo de la pasta

La pasta es bombeada desde la mina hasta la planta mediante el “pasto-ducto” una tubería de 10 km de longitud.

En la Planta

Sedimentación y almacenamiento

La pasta llega a la planta y es depositada en los espesadores, que tienen la función de reducir el agua de la pasta de un 50% a un 35% aproximadamente. Los espesadores son tanques que permiten que las partículas se sedimenten y sean extraídas por la parte inferior eliminando de la parte superior un 15% del agua aproximadamente.

Imagen 3. Espesadores



Fuente: Empresa XYZ

Molienda secundaria

La pasta que se extrae de los espesadores es enviada a unos molinos cilíndricos con recubrimiento de caucho, que por medio de roce (no por impacto) hacen más fina la pasta que reciben.

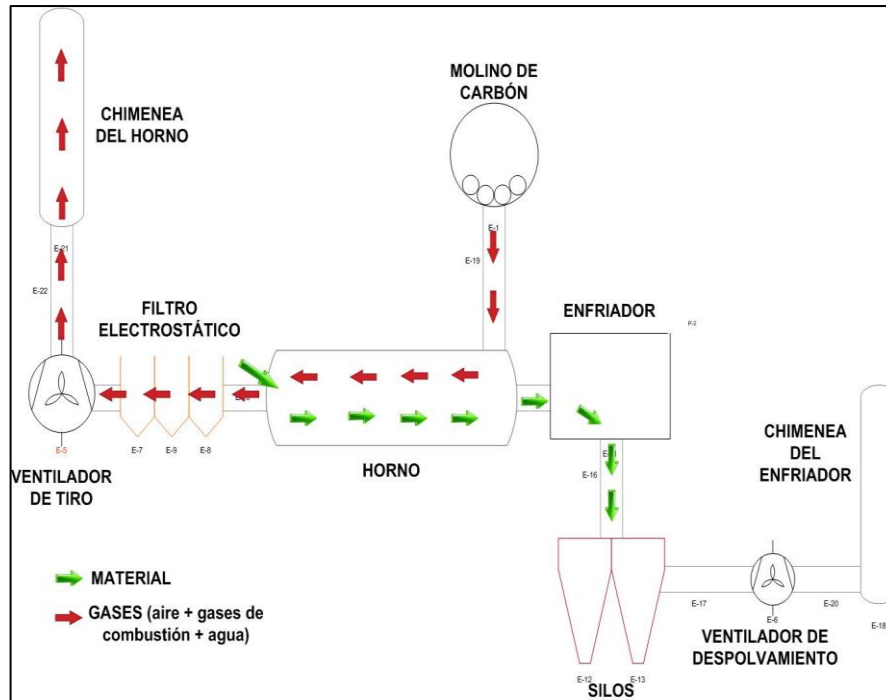
Homogenización

La pasta extraída de los molinos es enviada a unas balsas que cumplen la función de homogenizar el material.

Clinkerización (Hornos)

La pasta es ahora dirigida a los hornos que son estructuras cilíndricas con movimiento rotatorio continuo. Los hornos de proceso húmedo son más largos que los utilizados en el proceso de cemento seco, ya que necesitan más espacio para lograr evaporar el agua que contiene la pasta. Ver figura 5.

Figura 5. Esquema del horno



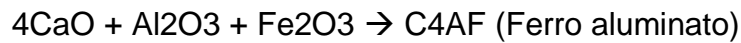
Fuente: La Autora

Como se muestra en el esquema anterior, el carbón es suministrado al horno desde el extremo final del mismo, y los gases de combustión recorren todo el horno absorbidos por el ventilador que se encuentra después de los filtros electrostáticos. La pasta entra al horno por el extremo opuesto al carbón. El horno puede entenderse en cuatro etapas: la primera etapa consiste en la evaporación del agua de la pasta, mediante un conjunto de cadenas de acero que cumplen la función de un intercambiador de calor, esta etapa presenta una temperatura de gases de 220°C aproximadamente. La segunda etapa es la descarbonatación que se da a los 900°C, la descarbonatación consiste en la descomposición del carbonato de calcio (CaCO_3) en óxido de calcio (CaO) y en dióxido de carbono (CO_2):

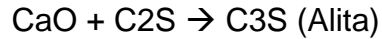


La tercera etapa son las reacciones de clinkerización, que son las siguientes reacciones exotérmicas y reversibles:





El C3A y el C4AF forman la fase líquida donde se forma la Alita:



El clinker es por tanto un material que se compone de las fases C3S, C2S, C3A y C4AF, y cada una de estas tiene una función particular de importancia en el cemento, resumidas en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción de las fases del clinker

Compuesto	Función en el cemento	Nivel típico (%)
C3S	Resistencias iniciales	57%
C2S	Resistencias finales	12%
C3A	Propiedades plásticas, reacciona muy rápidamente con el agua, lo que hace necesario añadirle yeso al cemento para retardar dicha reacción.	7,3%
C4AF	Da al cemento su color gris a causa del hierro, entre mas alto sea el contenido de C4AF más oscuro será el color del cemento.	11,3%

Fuente: La Autora

La cuarta y última etapa es la más cercana a la entrada del carbón y presenta por tanto temperaturas aproximadas de 1400°C, y es aquí donde está el clinker completamente formado y procede a extraerse del horno y dirigirse a los enfriadores.

Estas reacciones químicas pueden no darse adecuadamente en algunas situaciones. Por ejemplo, cuando se tiene mucha cal (CaO) en la pasta, se tendrá cal libre en el clinker lo que ocasiona, al exceder el 1% expansión en los concretos. Adicionalmente, si hay demasiada sílice en la pasta se cambiarán las proporciones de C3S y C2S.

El enfriador es una cámara conectada a la salida del horno que evita que los compuestos nuevos se rompan y mantiene los cristales nuevos, esto gracias al rápido enfriamiento del clinker.

Una parte del clinker es enviada directamente a la molienda de cemento y otra es dirigida hacia el almacén de materias primas.

Molienda de cemento

En los molinos se adiciona el clinker, el yeso y los agregados, en diferentes proporciones de acuerdo al tipo de cemento que se esté elaborando.

Para el caso del cemento concretero el porcentaje de agregados varía entre el 7 y el 9%, el yeso entre el 4 y 5%, y el clinker entre el 89 y el 86%. Los agregados en el cemento concretero son exclusivamente calizas.

Los molinos de cemento son molinos cilíndricos que inician con un proceso de impacto y luego continúan con fricción.

Silos de cemento

El cemento concretero extraído de los molinos es dirigido a los silos 4, 6 y 8 según se indique, donde espera a ser despachado a granel.

Los silos 4 y 8 tienen capacidades de 300 y 600 toneladas respectivamente. Estos dos silos son los únicos desde donde se despacha cemento concretero directamente a los carros. Adicionalmente se usa el silo 8, con capacidad de 5000 toneladas. Sin embargo desde este silo no se puede despachar, por lo que se traslada el cemento de este silo a los silos 4 y 6.

5.1.3 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la propiedad mecánica por la que se caracteriza el cemento. En especial, para el cemento concretero la resistencia a la compresión es un parámetro de vital importancia, dado que sus clientes diseñan sus estructuras con respecto a la resistencia a 28 días.

Por lo anterior, en la empresa XYZ se toma una muestra promedio día de los despachos de cemento concretero para realizar los ensayos de resistencia.

5.1.3.1 Ensayo de resistencia a la compresión

Los ensayos de resistencia a la compresión que se realizan al cemento, permiten determinar el cumplimiento de las especificaciones y siguen la norma ASTM C109/C109M-08¹⁹. Para realizar el ensayo, se fabrican cubos de mortero, cuya mezcla se realiza con una parte de cemento, 2.75 partes de arena estándar y 0.485 partes de agua. Una vez preparada esta mezcla, esta es aprisionada en un molde e introducida en un cuarto húmedo durante 24 horas. Los morteros que serán usados para la prueba de un día son llevados al equipo de la prueba y los demás son introducidos en tanques de agua dentro del cuarto húmedo. Estos moldes son retirados después de determinado tiempo y son llevados al equipo encargado de realizar la prueba.

Después de someter los cubos de mortero a la fuerza de compresión, se procede a registrar los datos y a calcular la media, la desviación y demás parámetros especificados en la norma.

Aparatos requeridos para la realización de las pruebas

- *Balanza*
- *Probeta*
- *Molde*
Elaborado en metal y no debe tener más de 3 cavidades para formar cubos. Cada cubo tiene 5cm de arista, equivalente a 125cm³
- *Mixer o mezclador*
Equipo que mezcla los materiales que conforman el mortero: agua, arena y cemento.
- *Paleta*
- *Recipiente*
- *Trapo*
Se requiere para después de ser humedecido, tapar el mixer mientras pasan los tiempos de espera estipulados.
- *Espátula plástica*
- *Espátula metálica*
- *Aprisionador o golpeador*
- *Cuarto de Mezcla*
Este es el lugar donde se prepara la mezcla o mortero de cemento, cuenta con temperatura y humedad relativa controladas: temperatura de 23 ± 4°C, y humedad relativa igual o mayor a 50%. Las características de este cuarto están determinadas con la norma C511-09.
- *Cuarto humero*

¹⁹ ASTM C109/C109M-08, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens)

Debe tener una temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa igual o mayor a 95%. El material de elaboración de este cuarto debe ser no corrosible. Debe tener tanques de agua para sumergir los cubos de mortero, cuya agua es saturada con hidróxido de calcio, para evitar la lixiviación del hidróxido de calcio de los cubos.

- *Maquina de hacer pruebas de compresión*

Proceso de la prueba de resistencia

1. *Alistamiento del molde*

Aplicar una capa delgada de “agente de liberación” en el interior del molde. Posteriormente, aplicar aceite y grasa usando un trapo, y finalmente, limpiar la cara superior del molde para remover el exceso. La imagen 4 muestra el molde en que se elaboran los cubos de mortero.

Imagen 4. Molde para elaboración de cubos de mortero



Fuente: La Autora

2. *Preparación del mortero*

El mortero es la mezcla de cemento, arena y agua. La norma C109/C109M-08 especifica que se la proporción de estos componentes es: 1 Parte de cemento, 2,75 partes de arena estándar, y 0,485 Partes de agua.

La forma particular de mezclar estos tres componentes viene especificada por la norma C305-6. Este proceso de mezcla inicia con el alistamiento de los materiales. Para la elaboración de 9 cubos de mortero cada uno de 125cm^3 se trabaja con 740 g de cemento concreto, 2035 g de arena ($740\text{g cemento} \times 2,75 = 2035$ g de arena), y 259 ml de agua ($740\text{ g cemento} \times 0,485$).

Una vez medidos y pesados los materiales se vierte el agua en el recipiente, seguida por el cemento, como se muestra en la imagen 5.

Imagen 5. Agregar el cemento al recipiente con agua



Fuente: La Autora

Posteriormente, se ubica la paleta y el recipiente en posición de mezcla en la mezcladora, como se ve en la imagen 6, y se mezcla a velocidad baja (140 ± 5 r/min) durante 30 segundos.

Imagen 6. Recipiente y paleta en posición de mezcla



Fuente: La Autora

Pasados los 30 segundos, se procede a agregar la arena durante otros 30 segundos, mientras se mezcla en velocidad lenta. Ver imagen 7.

Imagen 7. Agregar la arena al recipiente



Fuente: La Autora

Luego, se detiene la mezcladora, y se cambia a velocidad media (285 ± 10 r/min), mezclando por 30 segundos. Después de mezclar, se detiene la mezcladora para bajar el mortero de las paredes del recipiente haciendo uso de la espátula plástica, para este procedimiento se cuenta con 15 segundos.

En seguida, se cubre el recipiente con el trapo húmedo y se espera 30 segundos, como se muestra en la imagen 8.

Imagen 8. Recipiente cubierto con trapo húmedo



Fuente: La Autora

Finalmente, para terminar con la preparación del mortero se descubre el recipiente y se mezcla durante 60 segundos a velocidad media (285 ± 10 r/min).

3. *Moldear*

El proceso de modelo debe empezar en un periodo no mayor a 2 minutos y 30 segundos después de mezclar. El modelo inicia poniendo una primera capa de

mortero de 2,5 cm de grosor (aproximadamente la mitad de alto del molde) en cada uno de los 9 cubos a moldear.

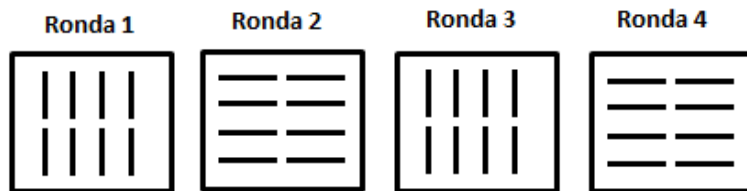
Imagen 9. Primera capa de mortero en el molde



Fuente: La Autora

Luego, se procede a golpear el mortero 32 veces en cada compartimiento, en aproximadamente 10 segundos y en 4 rondas, haciendo uso del aprisionador. Las cuatro rondas que se realizan en cada compartimiento se muestran en la figura 6. La imagen 10 muestra la forma en que se realizan los golpes.

Figura 6. Rondas de golpes para comprimir



Fuente: La Autora

Imagen 10. Rondas de golpes para comprimir



Fuente: La Autora

Posteriormente, se procede a agregar la segunda capa de mortero en el molde con la cantidad necesaria para llenar toda la cavidad, y se repiten la serie de golpes siguiendo la secuencia ya descrita.

Imagen 11. Segunda capa de mortero en el molde



Fuente: La Autora

Con la espátula metálica se retira el exceso de mortero de la superficie del molde, logrando una superficie plana.

Imagen 12. Retirar el exceso de mortero de la superficie



Fuente: La Autora

Finalmente se limpia el molde con un trapo húmedo para eliminar completamente el mortero de las paredes del molde.

4. Almacenamiento

Una vez se tienen los moldes listos, se procede a ubicarlos en el cuarto húmedo, donde reposan durante 20 a 27 horas

Pasadas 24 horas, se desmoldan los cubos, y los 2 cubos correspondientes a la prueba de resistencia a 1 día son retirados del cuarto húmedo para ser sometidos a la compresión. Los cubos restantes, que deben esperar más días

en el cuarto húmedo, dado que corresponden a pruebas de 3, 7 o 28 días, son sumergidos en los tanques de agua saturada de cal.

5. *Ensayo: determinar la resistencia a la compresión*

Pasado el tiempo requerido de almacenamiento, se realiza el ensayo de compresión, que consiste en ubicar el cubo en la compresora la cual aplica una fuerza al cubo hasta reventarlo. La fuerza que resiste el cubo antes de reventarse es registrada por el equipo, mostrada en la pantalla y registrada por los operarios de laboratorio.

La norma C109/C109M-08 establece unas tolerancias de tiempo permisibles entre la edad de la prueba y el tiempo real que transcurre entre el ensayo a la compresión y el moldeo de los cubos. La tabla 2 muestra estas las tolerancias.

Tabla 2. Tolerancias permisibles en la edad de las pruebas

Edad de la prueba	Tolerancia permisible
24 horas	± 1/2 hora
3 días	± 1 hora
7 días	± 3 horas
28 días	± 12 horas

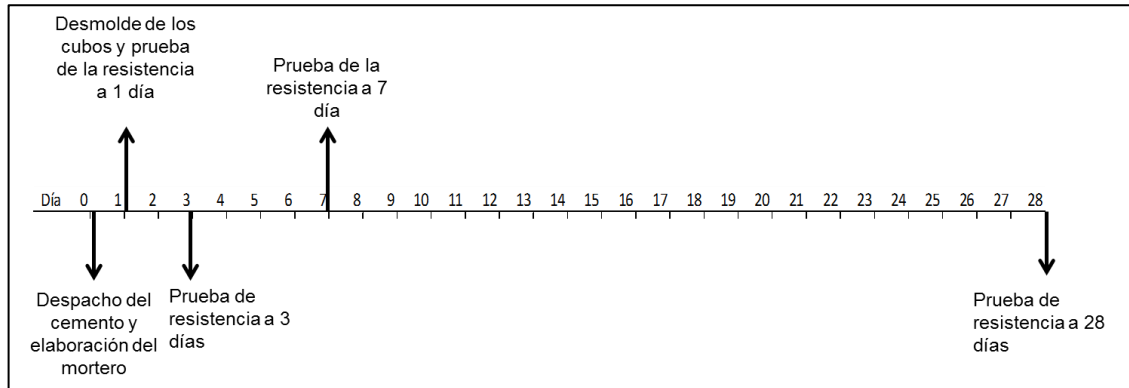
Fuente: ASTM C109/C109M-08

Pasados los 28 días, ya se han reventado los 9 cubos del lote de cemento al que se le realiza el ensayo, y por tanto se da por terminada la prueba para dicho cemento, despachado hace 28 días.

La prueba de resistencia a la compresión para el cemento concretero se realiza a partir del cemento despachado. Durante todo el día de despacho se toma una pequeña muestra de cada camión cisterna que es despachado y se recolecta en un recipiente. Al final del día, se mezcla el contenido de dicho recipiente y se extraen los 740 g de cemento que representan entonces la muestra del promedio día despachado. Al final del día se procede a elaborar el mortero con dicha muestra.

Un día después, se realiza la prueba de la resistencia a 1 día, reventando dos de los nueve cubos moldeados. Al tercer día se realiza la prueba sobre otros dos cubos, para registrar la resistencia a 3 días del cemento despachado el día cero. A los siete días se revientan otros dos cubos, y finalmente a los 28 días se realiza la prueba sobre los últimos 3 cubos para registrar la resistencia a 28 días. La figura 7 muestra en una línea de tiempo los momentos de las pruebas con respecto al día del moldeo y despacho del cemento.

Figura 7. Línea de tiempo del ensayo de resistencia a la compresión



Fuente: La Autora

Las resistencias a 1, 3 y 7 días son conocidas como las resistencias a temprana edad del cemento. La resistencia a 28 días por su parte, es la resistencia mas importante para el caso del cemento concretero, pues con este valor es con el que se diseñan las estructuras de las obras. Por esto, el valor de la resistencia a 28 días es el mas importante para los concreteros (fabricantes de concreto y clientes del cemento concretero).

5.1.3.2 Comportamiento de la resistencia a la compresión

EL cemento cuenta con otras normas, como la NTC 121²⁰, la ASTM C150²¹ y la C1157²² que especifican los valores mínimos de las resistencias en diferentes periodos. La empresa XYZ ha especificado su ficha técnica a partir de estas normas como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones de las resistencias

RESISTENCIA A:	ESPECIFICACIÓN EMPRESA XYZ	NTC 121
1 día	11	10
3 días	22	21
7 días	32.4	-
28 días	41.4	-

Fuente: Empresa XYX

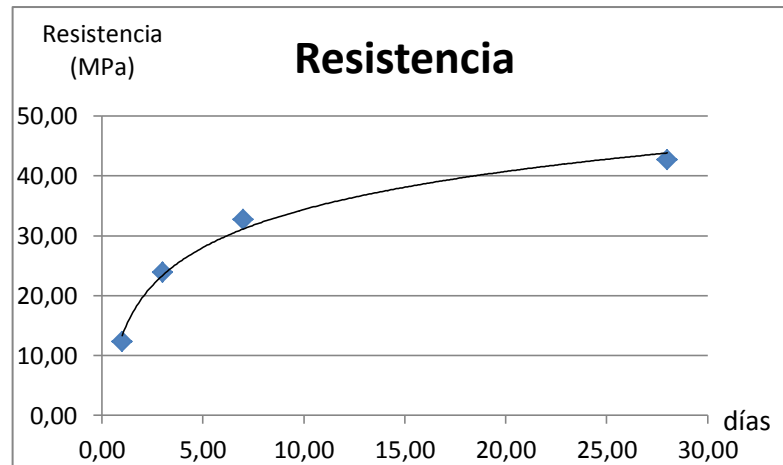
²⁰ NTC 121:1982, Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Físicas y Mecánicas

²¹ ASTM C150/C150M-11, Standard Specification of Portland Cement.

²² ASTM C1157/ C1157M-11, Standard Performance Specification of Hydraulic Cement

El comportamiento de la resistencia en función del tiempo muestra un comportamiento logarítmico; el aumento de la resistencia va disminuyendo a medida que pasa el tiempo. El cemento sigue desarrollando resistencia hasta aproximadamente un año después de utilizado como concreto, mortero o pasta. Sin embargo los cambios más significativos se dan hasta un periodo cercano a los 28 días.

Gráfico 2. Comportamiento de la resistencia a la compresión



Fuente: La Autora

El gráfico 2 muestra el comportamiento logarítmico de la resistencia con respecto al tiempo (días). Adicionalmente se encontró una alta correlación entre las resistencias obtenidas en diferentes periodos, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Coeficiente de correlación entre resistencias

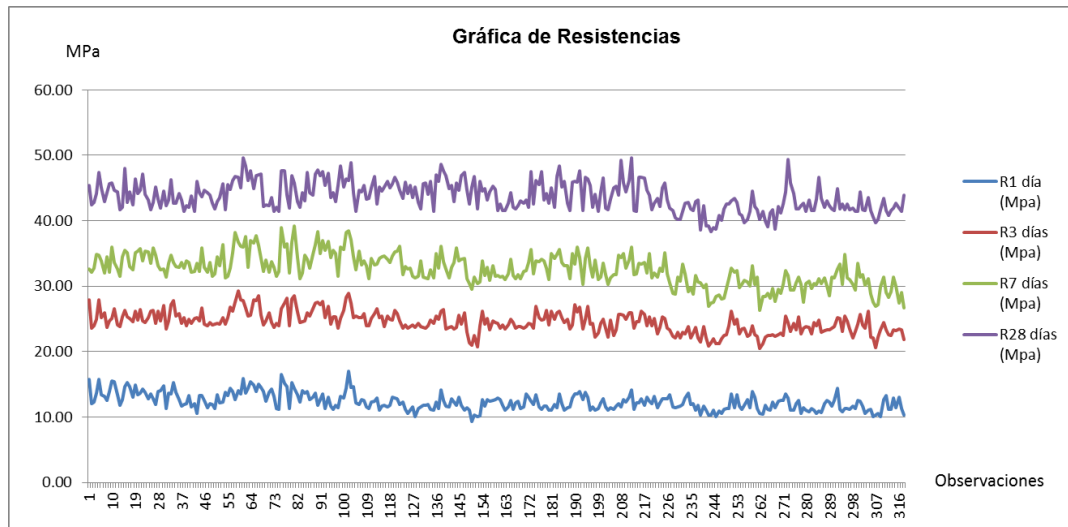
Correlación	R1	R3	R7	R28
R1	1			
R3	0,66392248	1		
R7	0,55686753	0,80758223	1	
R28	0,40581834	0,66095965	0,67849573	1

Fuente: La Autora

Dado que los valores de los coeficientes de correlación son mayores a 0,5 se puede afirmar que hay una correlación positiva fuerte entre las resistencias a diferentes días. Particularmente para la resistencia a 28 días se evidencia que presenta mayor relación con la resistencia a 7 días, conclusión que será tomada en cuenta en la realización del modelo de proyección.

Esta correlación que existe entre las resistencias se evidencia en el gráfico 3, pues muestra como el comportamiento es el mismo patrón para todas, y como se amplifican los picos y caídas de los valores.

Gráfico 3. Grafico conjunto de las resistencias



Fuente: La Autora

5.1.4 Análisis de capacidad, probabilidades y pruebas de normalidad

Dado que lo que busca la empresa XYZ es conocer los parámetros con los que se pueden comprometer con sus clientes de cemento concreto, de acuerdo a su variabilidad natural y a las condiciones actuales, es necesario realizar un análisis estadístico y calcular su capacidad de proceso.

A continuación se calcula la capacidad de proceso de cada una de las resistencias. Es importante aclarar que la base de datos con la que se realiza el análisis son las resistencias promedio día de 2011, eliminando datos atípicos para la prueba de normalidad.

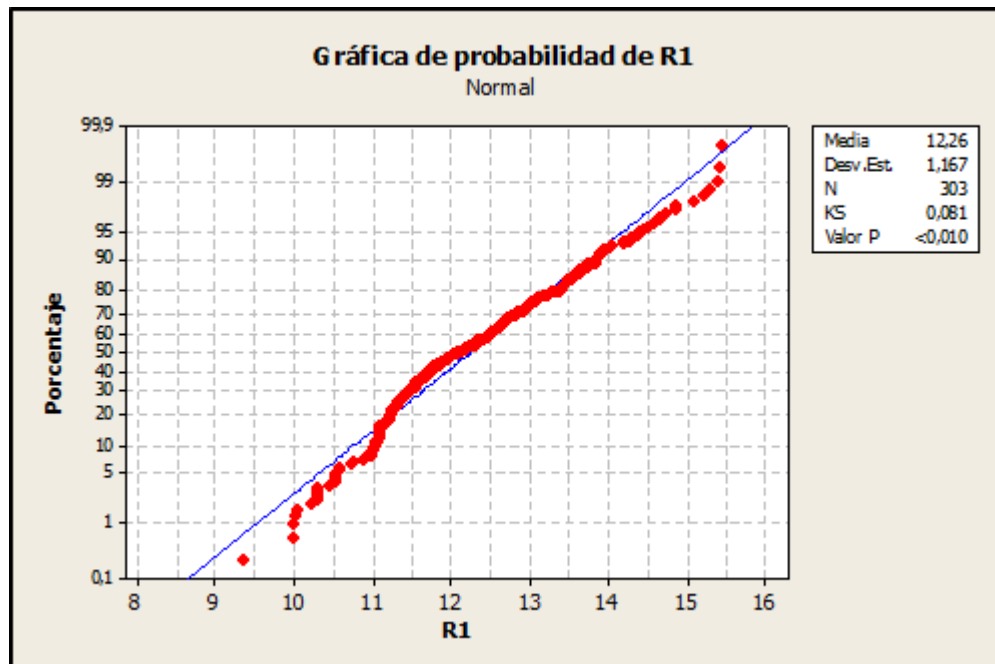
Análisis de la resistencia a 1 día

Para iniciar se realiza la prueba de normalidad mostrada en el gráfico 4. Dado que el valor P (0,829) de la prueba de kolmogorov-Smirnov es menor que 0,05, no se puede concluir por esta prueba que la resistencia a 1 día (R1) se distribuya de forma normal. Por tanto, se verificó mediante el teorema del límite central la normalidad de R, ver gráfico 5. El límite central por su parte indica que con un valor P (>0,15) mayor que 0,05 la resistencia a 1 día se distribuye de forma

normal. Se continúa con el uso de Minitab®16 para calcular la capacidad de proceso de esta variable.

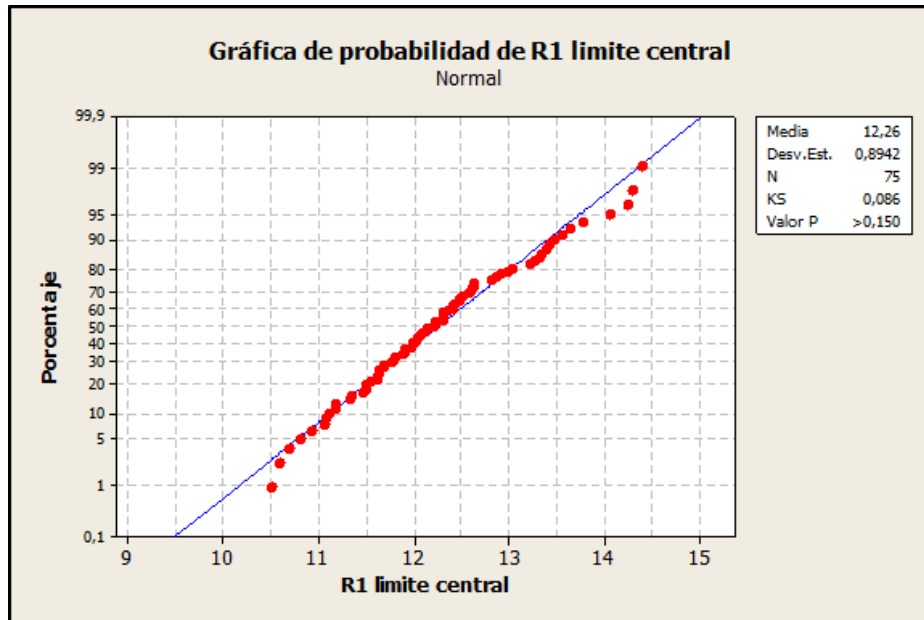
El gráfico 6 muestra el análisis de capacidad para esta variable. De éste gráfico se concluye que esta variable de salida tiene una capacidad e proceso de 0,55 y que aproximadamente el 5,75% de los despachos están fuera de especificación, es decir presentan resistencia a 1 día menor a 11 MPa. Sin embargo, dado que este índice de capacidad es menor que 1,25 no se puede afirmar que el proceso sea adecuado.

Gráfico 4. Prueba de normalidad para la resistencia a 1 día



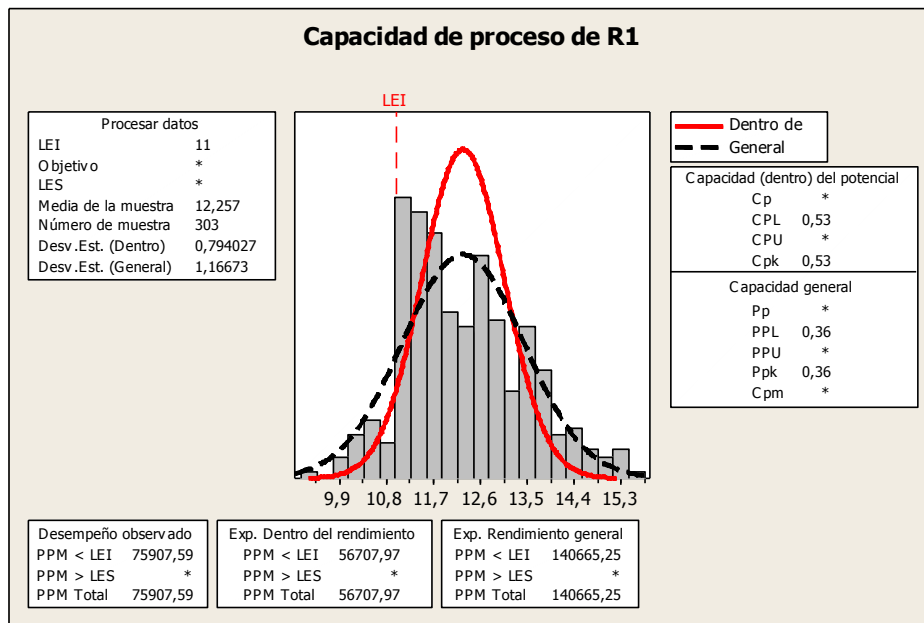
Fuente: La Autora

Gráfico 5. Resultados prueba de normalidad para la resistencia a 1 día, mediante el teorema del límite central



Fuente: La Autora

Gráfico 6. Capacidad de proceso según resistencia a 1 día



Fuente: La Autora

A partir de los datos históricos del 2011 se calculó el promedio, la desviación, el coeficiente de variación, y la probabilidad de caer tanto dentro como fuera de especificaciones. Estos resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Resumen de estimaciones y probabilidades para R1

ESPECIFICACIÓN INFERIOR (Mpa)	11
MEDIA O PROMEDIO (Mpa)	12,34
DESVIACIÓN ESTANDAR (Mpa)	1,30
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	10,6%
Pr {R1>11}	84,8%
Pr {R1<11}	15,2%

Fuente: La Autora

Lo anterior muestra que la resistencia promedio a 1 día de acuerdo a los datos recopilados en el 2011 es de 12,34 MPa, una desviación estándar de 1,30 MPa, y por tanto un coeficiente de variación de 10,6%. Dado que el coeficiente de variación es mayor a 10%, esto indica que la resistencia a 1 día está presentando alta variabilidad.

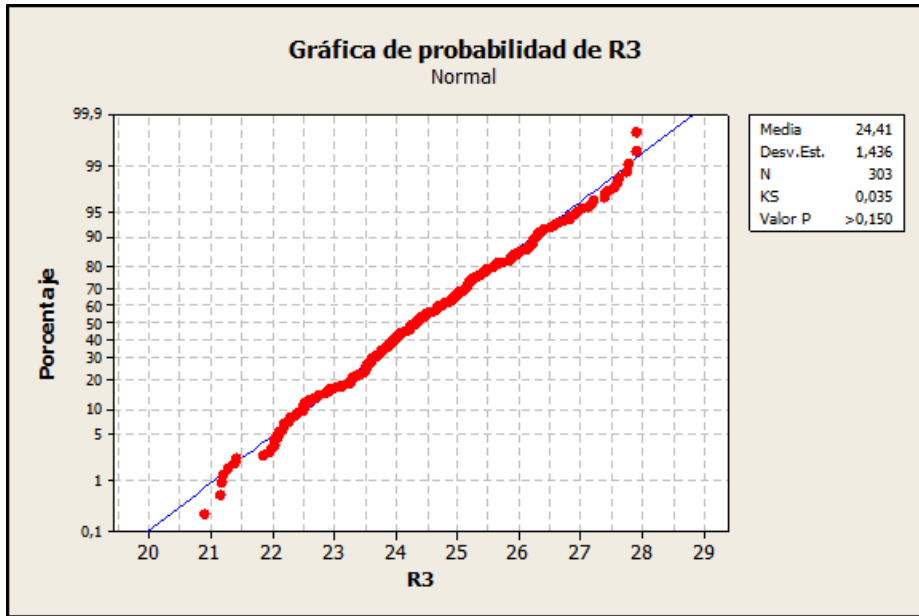
Adicionalmente, se aprecia que la probabilidad de despachar cemento que cumpla con la especificación, es decir que tenga un valor de resistencia a la compresión a 1 día mayor a 11 MPa es de 84,8%, y por ende un 15,2% de producto fuera de especificación. Este 15% de no conformidad se puede deber a la alta variabilidad de estos valores y a lo cercano que se encuentra la media de la especificación inferior.

Análisis de la resistencia a 3 días

La prueba de normalidad para la resistencia a 3 días (R3) se muestra en el gráfico 7. Dado que el valor P de la prueba es mayor que 0,05, se puede afirmar con un 95% de confiabilidad que la resistencia a 3 días se distribuye de forma normal. Se continúa con el uso de Minitab®16 para calcular la capacidad de proceso de esta variable.

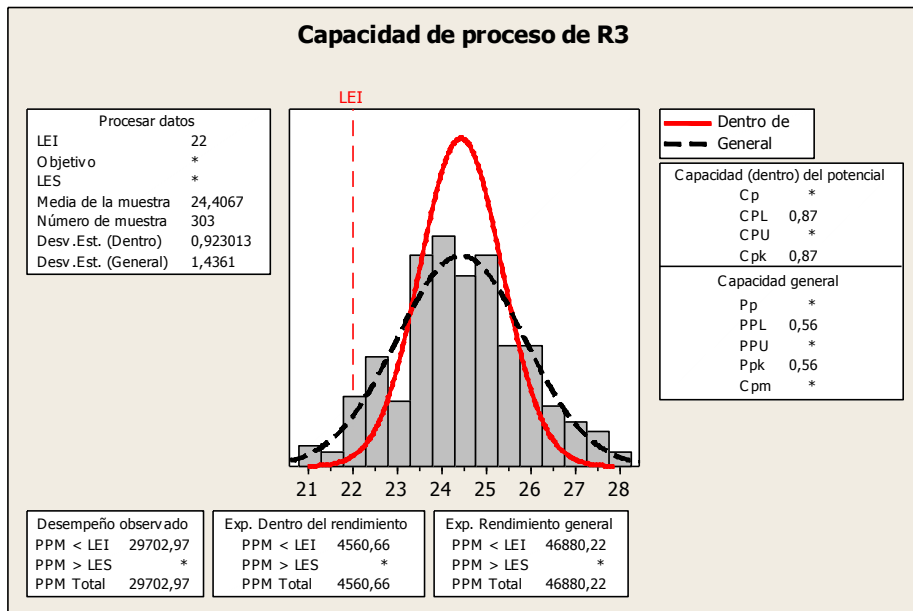
El gráfico 8 muestra el análisis de capacidad para esta variable. De este gráfico se concluye que esta variable de salida tiene una capacidad e proceso de 0,87 y que aproximadamente el 0,49% de los despachos están fuera de especificación, es decir presentan resistencia a 3 días menor a 22 MPa. Sin embargo, dado que este índice de capacidad es menor que 1,25 no se puede afirmar que el proceso sea adecuado.

Gráfico 7. Prueba de normalidad para la resistencia a 3 día



Fuente: La Autora

Gráfico 8. Capacidad de proceso según resistencia a 3 días



Fuente: La Autora

Al igual que se realizó para la resistencia a 1 día, se calculó el promedio, la desviación, el coeficiente de variación, y la probabilidad de caer tanto dentro como fuera de especificaciones, para la resistencia a 3 días. Estos resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Resumen de estimaciones y probabilidades para R3

ESPECIFICACIÓN INFERIOR (Mpa)	22
MEDIA O PROMEDIO (Mpa)	24,49
DESVIACIÓN ESTANDAR (Mpa)	1,63
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	6,65%
Pr {R1>22}	93,69%
Pr {R1<22}	6,31%

Fuente: La Autora

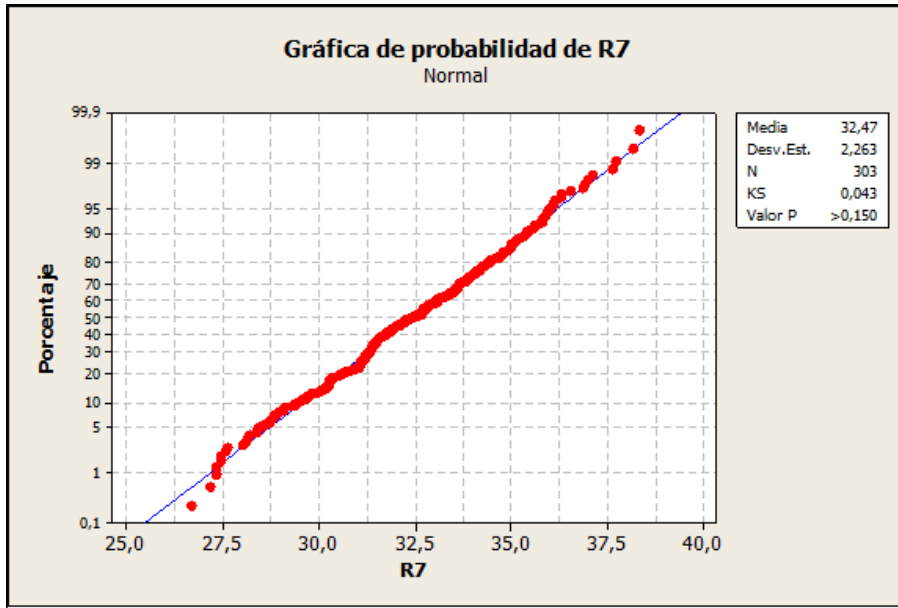
Lo anterior muestra que la resistencia promedio a 3 día de acuerdo a los datos recopilados en el 2011 es de 24,49 MPa, una desviación estándar de 1,63 MPa, y por tanto un coeficiente de variación de 6,65%. Dado que el coeficiente de variación es menor al 10% se indica que la resistencia a los 3 días tiene poca variabilidad entre sus valores. Adicionalmente, se aprecia que la probabilidad de despachar cemento que cumpla con la especificación es de 93,69%, y por ende un 6,31% de producto fuera de especificación.

Análisis de la resistencia a 7 días

La prueba de normalidad se muestra en el gráfico 9. Dado que el valor P de la prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor que 0,05, se puede afirmar con un 95% de confiabilidad que la resistencia a 7 días se distribuye de forma normal.

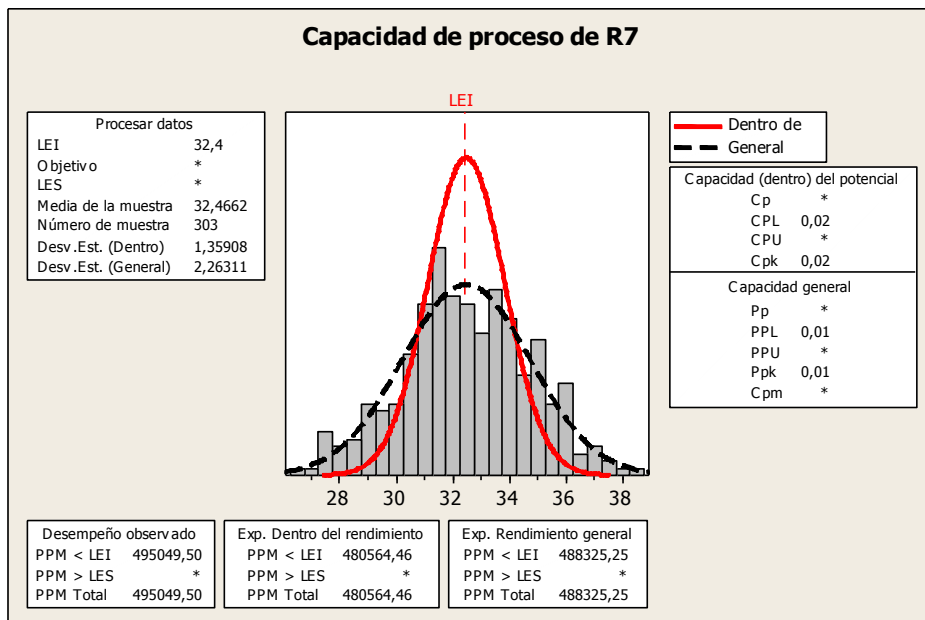
El gráfico 10 muestra el análisis de capacidad para esta variable. En este gráfico se muestra que esta variable de salida tiene una capacidad de proceso de 0,02 y que más del 28% de los despachos están fuera de especificación, es decir presentan resistencia a 7 días menor a 32,4 MPa. Dado que este índice de capacidad es menor que 1,25 no se puede afirmar que el proceso sea adecuado.

Gráfico 9. Prueba de normalidad para la resistencia a 7 día



Fuente: La Autora

Gráfico 10. Capacidad de proceso resistencia a 7 día



Fuente: La Autora

A partir de los datos históricos del 2011 se calculó el promedio, la desviación, el coeficiente de variación, y la probabilidad de caer tanto dentro como fuera de especificaciones para la resistencia a 7 días. Estos resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resumen de estimaciones y probabilidades para R7

ESPECIFICACIÓN INFERIOR (Mpa)	32,4
MEDIA O PROMEDIO (Mpa)	32,5533019
DESVIACIÓN ESTANDAR (Mpa)	2,44
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	7,49%
Pr {R1>32,4}	52,51%
Pr {R1<32,4}	47,49%

Fuente: La Autora

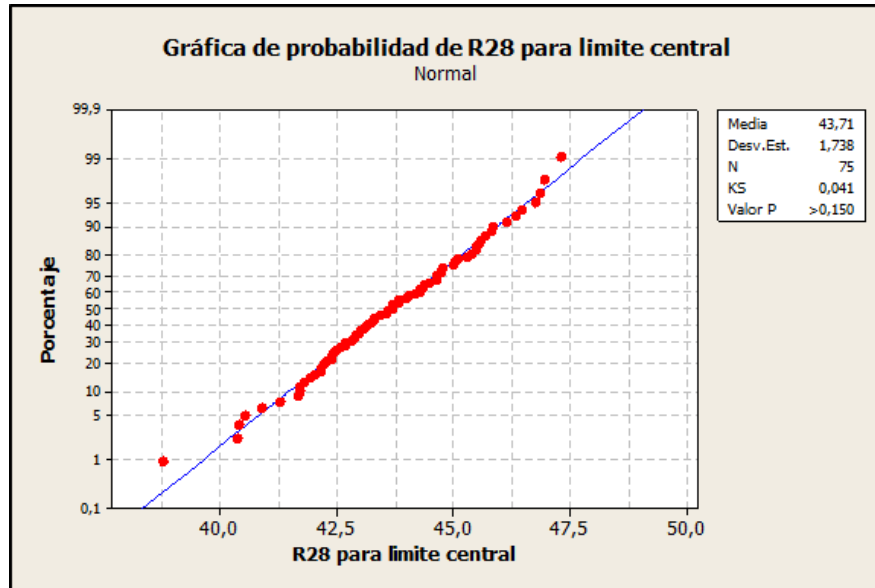
Lo anterior muestra que la resistencia promedio a 7 día de acuerdo a los datos recopilados en el 2011 es de 32,55 MPa. Este valor promedio indica una alerta en el proceso dado que se encuentra tan solo 0,15 MPa por arriba de la especificación inferior. La desviación estándar de 2,44 MPa, y por tanto presenta un coeficiente de variación de 7,49%, que al ser menor al 10% indica que la variación de la resistencia a 7 días es poca. Resulta importante resaltar la diferencia entre precisión y exactitud; la resistencia a 7 días presenta precisión en sus resultados dado que tiene poca variación alrededor de su media. Sin embargo, es inexacta dado que su media no tiene un valor correcto, pues debería estar por lo menos 7,3 MPa por arriba de lo que se encuentra en este momento.

Adicionalmente, se aprecia que la probabilidad de despachar cemento que cumpla con la especificación es de 52,52%, y por ende un 47,49% de producto fuera de especificación. Este alto porcentaje de producto fuera de especificación se debe al centrado del proceso, pues como ya se mencionó la media esta muy cercana a la especificación inferior.

Análisis de la resistencia a 28 días

La gráfica 11 muestra los resultados de la prueba de normalidad para la resistencia a 28 días, que se realizó mediante la aplicación del teorema del límite central, debido a que la prueba de Kolmogorov-Smirnov no dio resultado. Aquí se evidencia que el valor p es menor que 0,05 entonces, con un 95% de confianza se puede afirmar que el comportamiento de la resistencia a 28 días no es normal.

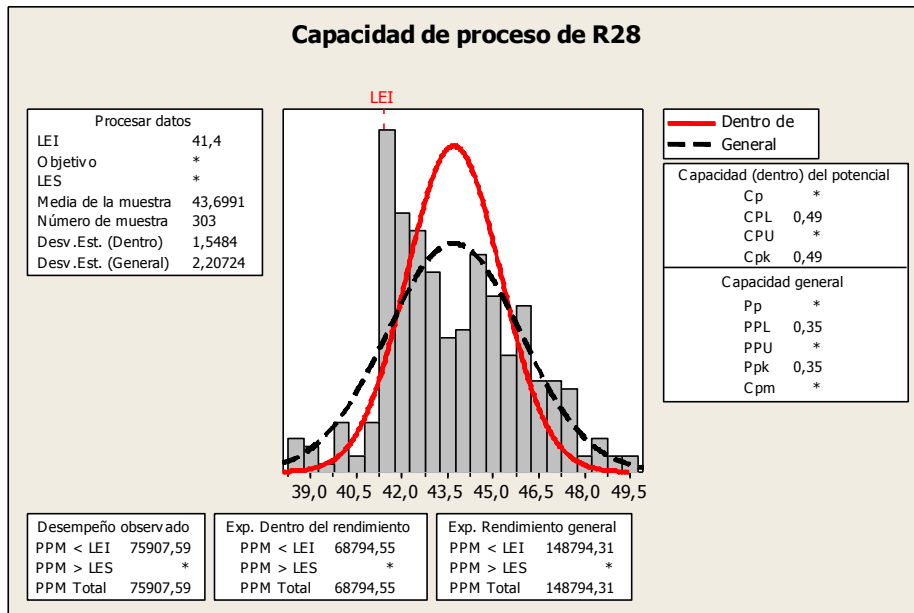
Gráfico 11. Prueba de normalidad para la resistencia a 28 días



Fuente: La Autora

La capacidad de proceso como se muestra en la gráfica 12 es 0,49. Esto implica hay 1,16% de los despachos estarán fuera de especificaciones.

Gráfico 12. Capacidad de proceso resistencia a 28 día



Fuente: La Autora

En conclusión la capacidad de proceso para cada una de estas variables indica que el proceso no está en condiciones de cumplir las especificaciones actuales. Por ende se debe considerar tanto la revisión de todo el proceso, como la posibilidad de cambiar las especificaciones.

A partir de los datos históricos del 2011 se calculó el promedio, la desviación, el coeficiente de variación, y la probabilidad de caer tanto dentro como fuera de especificaciones para la resistencia a 28 días. Estos resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Resumen de estimaciones y probabilidades para R28

ESPECIFICACIÓN INFERIOR (Mpa)	41,40
MEDIA O PROMEDIO (Mpa)	43,76
DESVIACIÓN ESTANDAR (Mpa)	2,27
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	5,19%
Pr {R28>41,4}	85,01%
Pr {R28<41,4}	14,99%

Fuente: La Autora

Lo anterior muestra que la resistencia promedio a 28 día de acuerdo a los datos recopilados en el 2011 es de 43,40 MPa, una desviación estándar de 2,27 MPa, y por tanto presenta un coeficiente de variación de 5,19%, que al ser menor al 10% indica que la variación de la resistencia a 28 días es poca. Comparando con los coeficientes de variación de las resistencias tempranas, se concluye que la resistencia a 28 días es la que menor variabilidad presenta en sus valores.

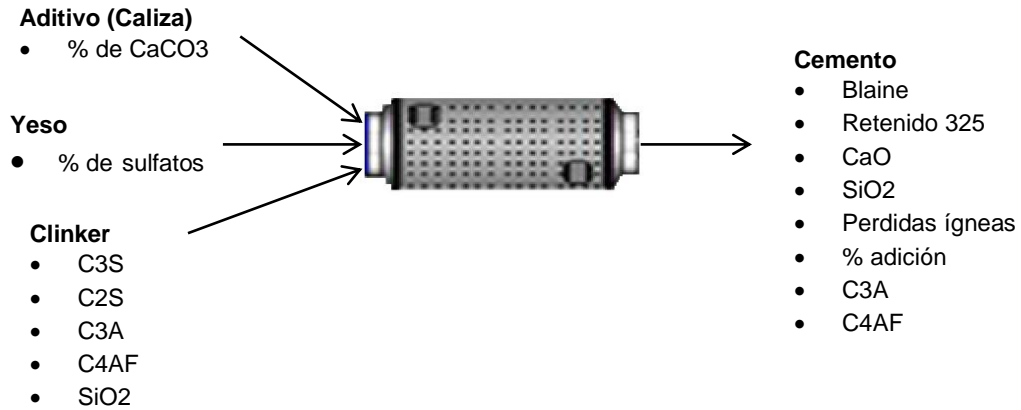
Adicionalmente, se aprecia que la probabilidad de despachar cemento que cumpla con la especificación, es decir que tenga un valor de resistencia a la compresión a 28 día mayor a 41,4 MPa es de 85,01%, y por ende un 14,99% de producto fuera de especificación. Dado que la variabilidad de la resistencia a 28 días no es alta, el 14,99% de producto que se despacha fuera de especificaciones es consecuencia principalmente del centrado del proceso.

5.1.6 Variables y parámetros que influyen en la resistencia a la compresión a 28 días.

En primera instancia, partiendo del conocimiento de la empresa se definieron las principales que afectan la resistencia. A continuación, se describen 15 variables identificadas en el proceso de molienda, cuyo contexto se ilustra en la figura 8.

- **Blaine**

Figura 8. Variables que afectan la resistencia, dentro del proceso de molienda



Fuente: Empresa XYZ

Es una medida de la finura del cemento, se expresa en unidades de superficie por unidad de masa (cm²/gr). Este parámetro se determina mediante el aparato Blaine, que mide la permisibilidad que tiene el cemento para dejar pasar aire a través de sus poros.

La finura del cemento influye en el desarrollo de la resistencia y endurecimiento. Una molienda más fina acelera el fraguado, por lo que la resistencia final es generalmente mayor para un cemento más fino.

La finura Blaine es un estándar obligatorio por lo que su valor mínimo debe ser de 2600 cm²/gr.

- **Retenido**

Se mide en la malla 325, mide lo que no pasa por la malla, por lo tanto entre más pequeño sea el retenido entonces más fino es el cemento.

- **Óxido de Calcio (CaO)**

Es el principal compuesto de la roca caliza y es quien logra reaccionar con otros compuestos como el SiO₂, el Al₂O₃ y el Fe₂O₃ para formar C₂S, Aluminato tricalcico (C₃A), Ferro Aluminato (C₄AF) y el C₃S.

Es importante que la mayoría del óxido de calcio reaccione con los demás componentes, pues esto asegura las propiedades necesarias para el cemento. Además la cal libre en el cemento puede llegar a ocasionar defectos en cuanto a la expansión volumétrica debido a la lenta hidratación de este componente,

es decir que este componente continúa hidratándose hasta varios meses o años después de su contacto con el agua, lo que produce grietas y daños en las estructuras.

- **Dióxido de Sílice (SiO₂)**

El dióxido de sílice es un compuesto proveniente de la roca caliza, que reacciona con el óxido de calcio para formar silicato di cálcico conocido como Belita (C₂S), que es uno de los cuatro componentes del clinker.

- **Perdidas Ígneas (P.I)**

Representa la cantidad de material orgánico que se encuentra en el cemento, y se compone principalmente por las adiciones que se agregan al cemento.

- **% de adición**

Es la cantidad de adición, en este caso caliza, que se agrega al cemento durante la molienda. Para el cemento concretero este porcentaje fluctúa alrededor de 4%.

Dado que aproximadamente un 87% del cemento concretero es clinker se entra a analizar las variables que influyen en la calidad de este material a partir del análisis del horno como sistema. Ver figura 9.

Figura 9. Variables que influyen en la resistencia, dentro de la clinkerización



Fuente: Empresa XYZ

Las variables adicionales son las siguientes (en lo que respecta a la pasta):

- **LFS**

Para controlar el contenido de cal (C), de sílice (S), de alúmina (A) y de hierro (H) en la pasta se calcula el Factor de Saturación de Cal (LSF) de la siguiente fórmula:

$$LSF = \frac{C \times 100}{S \times 2,8 + A \times 1,2 + F \times 0,65} \quad \text{Ec. 5.1}$$

- **MS (Módulo Silícico)**

El módulo silícico indica la cantidad de sílice presente en la pasta o mezcla con relación a la cantidad de alúmina y de hierro.

$$MS = \frac{S}{A+F} \quad \text{Ec. 5.2}$$

- **MA (Módulo de Alúmina)**

Describe la proporción de alúmina presente en la pasta con respecto al hierro.

$$MA = \frac{A}{F} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Para las tres relaciones anteriores se presentan los siguientes niveles típicos y límites que se espera en el clinker. Para la empresa XYZ se presenta en la tabla 9 el resumen de dichos valores.

Tabla 9. Límites y nivel típico del LFS, MS y MA

Relación	Nivel típico	Límites
LSF	95	91 - 97
MS	2,5	2,2 - 3,3
MA	1,6	1,4 - 2,2

Fuente: Empresa XYZ

Esta descripción muestra que son muchas las variables que afectan la resistencia a la compresión, sin embargo no todas tienen alto impacto en su variación. Adicionalmente hay unas variables que ajustarse tardan más de 10 días en mostrar su impacto sobre la resistencia, y otras que por el contrario tardan solo un par de días.

Por ende se ha decidido trabajar solo con aquellas variables que tardan menos tiempo en impactar la resistencia. Estas variables corresponden a las características físicas del cemento, y se adecuan en la molienda.

Estas variables son entonces: finura (Blaine y retenido 325), proporción de materias primas, y dosificación de aditivo químico. Estas variables han sido razón de muchos estudios realizados en la industria cementera, por parte de organizaciones técnicas, centro de estudio y las mismas industrias, con reconocimiento internacional.

En la Empresa XYZ, se tienen entre otras acciones, dos reglas o medidas de ajuste:

Incremento en el contenido de clinker

De acuerdo con un análisis realizado por GRACE Construction Products, se sabe un incremento en un 1% en el contenido de Clinker para la mezcla de cemento genera los siguientes incrementos en la resistencia:

- R1d = 0,4 MPa
- R3d = 0,6 MPa
- R7d = 0,8 MPa
- R28d = 1 MPa

Aumento de la finura

De acuerdo a una investigación realizada por J. Gebauer en “Holderbank” Administración y Asesoría S.A Departamento químico, titulada “Influencia de la finura de los cementos portland sobre las resistencias del mortero y el concreto” se concluye que:

- Un aumento en 900 cm²/gr en el Blaine genera un incremento del 30% en la resistencia a 1 día del cemento concreto, y de un 4% en la resistencia a 28 días

5.2 METODOLOGÍA PARA PROYECTAR DE MANERA ANTICIPADA LA RESISTENCIA A 28 DÍAS

5.2.1 Evaluación de métodos de proyección

Con base en los métodos de proyección, estimación y pronóstico, estudiados en el marco teórico, se inició un proceso de análisis de las variables para seleccionar el método mas adecuado para realizar lograr estimar la resistencia a 2r días (R28).

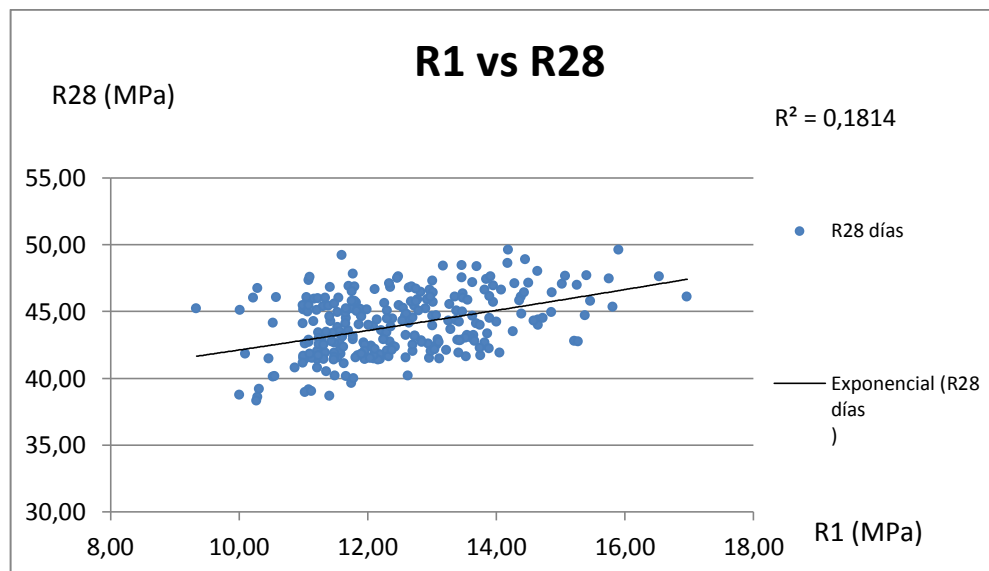
5.2.1.1 Regresión

Tipo de relación entre las resistencias tempranas y la resistencia a 28 días

Se inicia con la regresión como método para elaborar el modelo de proyección de la resistencia a la compresión a 28 días (R28), y por tanto se realiza un análisis del tipo de relación que existe entre esta variable y las resistencias tempranas.

Por medio de Excel se determinó el R cuadrado para cinco modelos de relación: exponencial, lineal, polinómica de segundo grado, logarítmica y potencial, mostrados en la tabla 10. Además, el gráfico 13 muestra el diagrama de dispersión del tipo de tendencia con mayor R cuadrado, que es en este caso una relación exponencial entre R1 y R28. Sin embargo el R cuadrado para todas las evaluaciones es tan bajo, que sumado a un coeficiente de correlación (0,4058) menor que 0,5 se concluye que la resistencia a 1 día por si sola no será una buena variable para proyectar la resistencia a 28 días por el método de regresión.

Gráfico 13. Diagrama de dispersión R1 vs R28



Fuente: La Autora

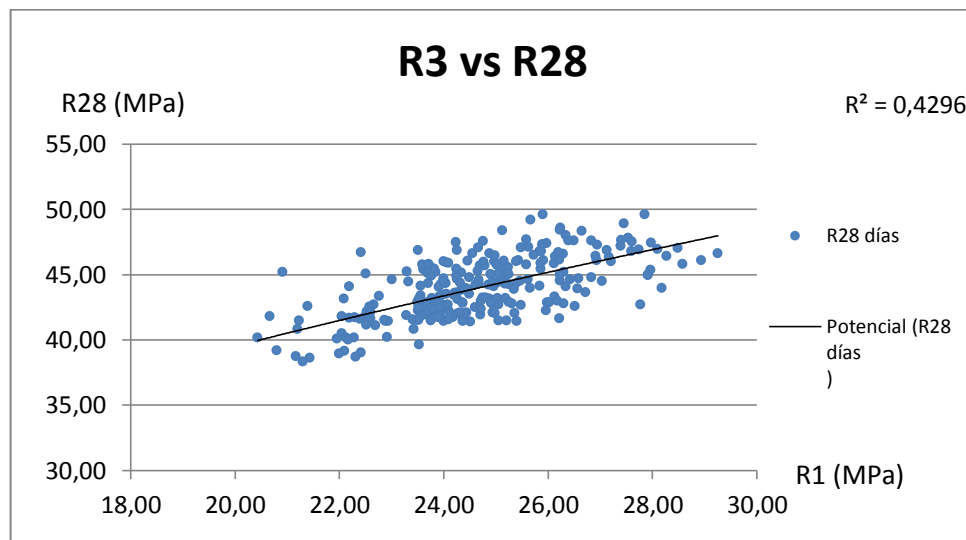
Tabla 10. Evaluación de modelos para la relación R1 y R28

Relación	R cuadrado
Exponencial	0,1814
Polinómica	0,1809
Lineal	0,1807
Potencial	0,1800
Logarítmica	0,1788

Fuente: La Autora

De igual forma a como se hizo con la resistencia a 1 día se evaluó la relación entre la resistencia a 3 días (R3) y R28, expuesta en el gráfico 14 y en la tabla 10. En este caso el R cuadrado mejoró aproximadamente en 0,24, sin embargo el valor del R cuadrado sigue siendo bajo. Este valor de R cuadrado sujeto a un coeficiente de correlación (0,66095965) mayor que 0,5 permite observar que R3 a pesar de llegar a ser por si mismo un predictor no muy bueno de R28, tiene una mejor relación que la que R1 tiene con R28. El tipo de tendencia adecuada para estas dos variables es la potencial o polinómica de segundo grado.

Gráfico 14. Diagrama de dispersión R3 vs R28



Fuente: La Autora

Tabla 11. Evaluación de modelos para la relación R3 y R28

Relación	R cuadrado
Potencial	0,4296
Polinómica	0,4290
Logarítmica	0,4253
Exponencial	0,4245
Lineal	0,4211

Fuente: La Autora

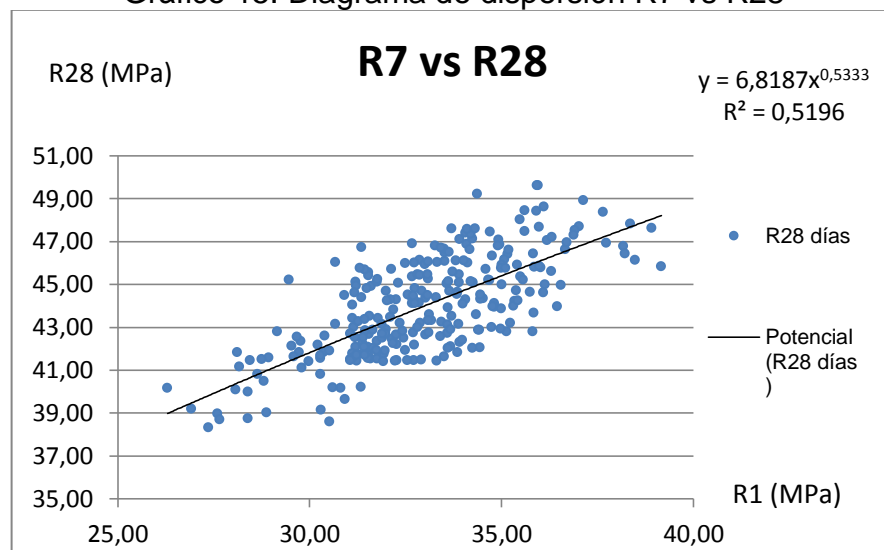
El gráfico 15 y la tabla 12 muestran la relación entre la resistencia 7 días y R28, y el mejor modelo que define su relación. El R cuadrado entre estas dos variables es ahora mayor, al igual que el coeficiente de correlación (0,67849573). Esto indica que R7 por si misma puede llegar a ser una buena variable predictora de R28, siempre y cuando se hagan ajustes a los modelos evaluados en el gráfico 6.

Tabla 12. Evaluación de modelos para la relación R7 y R28

Relación	R cuadrado
Potencial	0,5196
Exponencial	0,5155
Polinómica	0,5150
Logarítmica	0,5145
Lineal	0,5115

Fuente: La Autora

Gráfico 15. Diagrama de dispersión R7 vs R28



Fuente: La Autora

Modelos de pronóstico de R28 a partir de R1

Partiendo del análisis anterior se observa que la relación que mejor representa a R1 con R28 es la exponencial. Por tanto, se procede a establecer un modelo exponencial entre estas dos variables:

$$R28 = ae^{bR1} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Aplicando linealización a este modelo se obtiene:

$$\ln(R28) = \ln(ae^{bR1})$$

$$\ln(R28) = \ln(a) + \ln(e^{bR1})$$

$$\ln(R28) = \ln(a) + bR1 \ln(e)$$

$$\ln(R28) = \ln(a) + bR1 \quad \text{Ec. 5.5}$$

Ahora se obtiene una ecuación lineal de la forma $Y=c+dX$, donde Y equivale al logaritmo de la resistencia a 28 días, la pendiente c equivale a $\ln(a)$, el coeficiente b equivale a d, y la variable X corresponde a la resistencia a 1 día.

Corriendo el modelo en Minitab®16 se obtienen los resultados mostrados en la imagen 13.

Imagen 13. Resumen modelo regresión logarítmica R1 vs R28

Análisis de regresión: ln(R28) vs. R1				
La ecuación de regresión es				
ln(R28) = 3,57 + 0,0170 R1				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	3,57067	0,02770	128,90	0,000
R1	0,016987	0,002208	7,69	0,000
S = 0,0473453 R-cuad. = 18,1% R-cuad. (ajustado) = 17,8%				

Fuente: La Autora

Estos resultados indican que para este modelo la resistencia a 1 día solo representa el 17,8% de la variabilidad de la resistencia a 28 días.

Debido a los resultados obtenidos se procede a evaluar la posibilidad de un modelo polinómico de la forma: $R28= \beta_0 + \beta_1 (R1) + \beta_2 (R1)^2$. Sin embargo los resultados, expuestos en la imagen 14, tampoco fueron buenos, pues se obtuvo un R cuadrado ajustado de 17,5%, lo que indica que en este modelo la resistencia a 1 día solo representa el 17,5% de la variación de la resistencia a 28 días.

Imagen 14. Resumen modelo regresión polinómica R1 vs R28

Análisis de regresión: R28 vs. R1. R1^2					
La ecuación de regresión es					
$R28 = 37,1 + 0,37 R1 + 0,0147 R1^2$					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constante	37,118	9,125	4,07	0,000	
R1	0,366	1,423	0,26	0,798	
R1^2	0,01469	0,05512	0,27	0,790	
S = 2,08188 R-cuad. = 18,1% R-cuad.(ajustado) = 17,5%					

Fuente: La Autora

Dado que los modelos para proyectar R28 a partir de R1 no dan un buen ajuste, se procede a realizar el análisis con R3.

Modelos de pronóstico de R28 a partir de R3

Partiendo del análisis del tipo de relación que existe entre estas dos variables, se comienza por evaluar una relación potencial entre la resistencia a 3 días y a 28 días.

$$R28 = aR3^b \quad \text{Ec. 5.6}$$

Aplicando linealización a este modelo se obtiene:

$$\ln(R28) = \ln(aR3^b)$$

$$\ln(R28) = \ln(a) + \ln(R3^b)$$

$$\ln(R28) = \ln(a) + b \ln(R3) \quad \text{Ec. 5.7}$$

Esta ecuación ahora tiene la forma de una ecuación lineal de la forma $Y=c+dX$, donde Y equivale al logaritmo de la resistencia a 28 días, la pendiente c equivale a $\ln(a)$, el coeficiente d equivale a la constante b, y la variable X corresponde al logaritmo de la resistencia a 3 días

Corriendo este modelo en Minitab®16 se obtienen los resultados mostrados en la imagen 15.

Imagen 15. Resumen modelo regresión logarítmica R3 vs R28

Análisis de regresión: ln(R28) vs. ln(R3)

La ecuación de regresión es
 $\ln(R28) = 2,15 + 0,510 \ln(R3)$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	2,1493	0,1152	18,66	0,000
ln(R3)	0,50996	0,03596	14,18	0,000

S = 0,0395223 R-cuad. = 43,0% R-cuad.(ajustado) = 42,7%

Fuente: La Autora

En este modelo se aprecia un incremento significativo en comparación con el R cuadrado ajustado obtenido para los modelos de R1, sin embargo estos continúan siendo regulares, puesto que indican que para este modelo la resistencia a 3 días solo explica el 42,7% de la variación de la resistencia a 28 días.

Debido al resultado anterior se procede a evaluar un modelo de regresión polinómico, que equivale al segundo tipo de relación recomendado para estas dos variables. El modelo tiene la forma: $R28 = \beta_0 + \beta_1 (R3) + \beta_2 (R3)^2$, y se obtuvieron los resultados expuestos en la imagen 16.

Imagen 16. Resumen modelo regresión polinómica R3 vs R28

Análisis de regresión: R28 vs. R3. R3^2

La ecuación de regresión es
 $R28 = -10,4 + 3,51 R3 - 0,0527 R3^2$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	-10,35	16,84	-0,61	0,539
R3	3,508	1,361	2,58	0,010
R3^2	-0,05266	0,02745	-1,92	0,056

S = 1,73821 R-cuad. = 42,9% R-cuad.(ajustado) = 42,5%

Fuente: La Autora

El R cuadrado de este modelo es incluso un poco mas bajo que el del modelo anterior, por lo que se prosigue con la búsqueda de mejores modelos.

Observando el modelo anterior se percibe que dado el caso de no tener valor asignado para R3 (resistencia a 28 días) la variable R28 tampoco debería tener valor alguno, entonces se propone evaluar el modelo anterior sin el intercepto. Es decir el modelo: $R28 = \beta_1 (R3) + \beta_2 (R3)^2$. Ver tabla 13 con resultados del modelo.

Este es el primer modelo que presenta un R cuadrado ajustado alto, con un valor de 99.4%, lo que aparentemente muestra que en este modelo la resistencia a los 3 días explica el 99.4% de la variación de la resistencia a 28 días. Adicionalmente, tanto el modelo como los coeficientes son significativos.

Sin embargo para poder afirmar esto se deben verificar los tres supuestos de la regresión: normalidad, igualdad de varianzas e independencia. Este modelo cumple el supuesto de normalidad y el de igualdad de varianzas, pero incumple el supuesto de independencia y aleatoriedad de los residuos.

A raíz de estos y muchos otros resultados no deseados con los modelos de R3, se prosigue con la variable resistencia a 7 días.

Tabla 13. Resumen modelo regresión polinómica R3 vs R28 sin intercepto

<i>Estadísticas de la regresión</i>		
Coefficiente de correlación múltiple	0.999228708	
Coefficiente de determinación R ²	0.998458011	
R ² ajustado	0.994706918	
Error típico	1.736181749	
Observaciones	269	
ANÁLISIS DE VARIANZA		
	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	521135.0541	0
Residuos	804.8253261	
Total	521939.8794	
	<i>Coefficientes</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	0	#N/A
R3 días		
(Mpa)	2.67227302	2.0939E-118
R3 ²	-0.035860535	2.39932E-33

Fuente: La Autora

Modelos de pronóstico de R28 a partir de R7

De acuerdo al tipo de relación que existe entre la resistencia a 7 y a 28 días, se procede con la creación de un modelo potencial, que al linealizarse se expresa de la siguiente forma:

$$\ln(R28) = \ln(a) + b \ln(R7) \quad \text{Ec. 5.8}$$

Donde se aprecia la forma lineal $Y=c+dX$, donde Y equivale al logaritmo de la resistencia a 28 días, la pendiente c equivale a $\ln(a)$, el coeficiente d equivale a la constante b, y la variable X corresponde al logaritmo de la resistencia a 7 días.

Al correr el modelo se obtiene los resultados expuestos en la imagen 17.

En este modelo se aprecia que el R cuadrado ajustado ha ido aumentando con respecto a los modelos mencionados con anterioridad. Sin embargo este valor continua siendo bajo, pues indica que el modelo solo representa el 51.8% de la variación de la resistencia a 28 días.

Imagen 17. Resumen modelo regresión logarítmica R7 vs R28

Análisis de regresión: ln(R28) vs. ln(R7)					
La ecuación de regresión es					
$\ln(R28) = 1,92 + 0,533 \ln(R7)$					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constante	1,9197	0,1097	17,51	0,000	
ln(R7)	0,53327	0,03138	16,99	0,000	
S = 0,0362707 R-cuad. = 52,0% R-cuad. (ajustado) = 51,8%					

Fuente: La Autora

Se continúa entonces con el planteamiento de un modelo exponencial, que al linealizarlo presenta la siguiente forma:

$$\ln(R28) = \ln(a) + bR7 \quad \text{Ec. 5.9}$$

Al correr el modelo se obtuvieron los resultados expuestos en la imagen 18.

Imagen 18. Resumen modelo exponencial R7 vs R28

Análisis de regresión: ln(R28) vs. R7				
La ecuación de regresión es				
ln(R28) = 3,25 + 0,0162 R7				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	3,24681	0,03186	101,89	0,000
R7	0,0162459	0,0009639	16,86	0,000
S = 0,0364236 R-cuad. = 51,6% R-cuad. (ajustado) = 51,4%				

Fuente: La Autora

El R cuadrado ajustado continúa sin incrementarse significativamente, entonces se prosigue con el análisis de un modelo cuadrático de la forma: $R28 = \beta_0 + \beta_1 (R7) + \beta_2 (R7)^2$.

Al generar el modelo se obtienen los resultados expuestos en la imagen 19.

Imagen 19. Resumen modelo polinómico R7 vs R28

Análisis de regresión: R28 vs. R7. R7^2				
La ecuación de regresión es				
$R28 = 1,5 + 1,88 R7 - 0,0177 R7^2$				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	1,49	13,79	0,11	0,914
R7	1,8756	0,8390	2,24	0,026
R7^2	-0,01771	0,01273	-1,39	0,165
S = 1,60203 R-cuad. = 51,5% R-cuad. (ajustado) = 51,1%				

Fuente: La Autora

Como el R cuadrado ajustado continúa deficiente, se realiza el mismo análisis que se hizo con la resistencia a 3 días: eliminar el intercepto del modelo. Estos resultados dieron favorables y están expuestos en el ítem correspondiente a modelo final de proyección.

Modelos con mejor ajuste: R7 vs R28

Finalmente partiendo del modelo $R28 = \beta_0 + \beta_1 (R7) + \beta_2 (R7)^2$, que obtiene un R cuadrado ajustado de 0,5113 se plantea la opción de eliminar el intercepto bajo el análisis que si el valor de la resistencia a 7 días es cero, el valor de la resistencia a 28 días debe ser también cero. Por tanto se toma el siguiente modelo: $R28 = \beta_1 (R7) + \beta_2 (R7)^2$, y se decide trabajar con un 99% de confiabilidad, equivalente a una significancia (α) de 0,01.

A partir de los datos de enero a octubre de 2011 se corre la regresión bajo el modelo planteado. Se obtienen los resultados expuestos en la tabla 14. Este modelo presenta un R cuadrado ajustado muy bueno de 0,9949 lo que indica que el 99,49% de la variación de R28 se explica por R7. Una vez obtenido este R cuadrado tan alto, se prosigue a evaluar la significancia del modelo y de los coeficientes, y verificar los supuestos de la regresión: normalidad, igualdad de varianzas y aleatoriedad e independencia.

Tabla 14. Resumen de regresión modelo cuadrático sin intercepto

<i>Estadísticas de la regresión</i>		
Coficiente de correlación múltiple	0,999345765	
Coficiente de determinación R ²	0,998691957	
R ² ajustado	0,994941740	
Error típico	1,599062904	
Observaciones	269	
ANÁLISIS DE VARIANZA		
	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	521257,1598	0
Residuos	682,7195798	
Total	521939,8794	
	<i>Coficientes</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	0	#N/A
R7 días (Mpa)	1,966073501	4,7979E-128
R7 ²	-0,019077353	1,68801E-36

Fuente: La Autora

Significancia del modelo:

Para probar la significancia del modelo se plantea la siguiente prueba de hipótesis:

Ho: Todos los coeficientes del modelo son iguales a cero

Ha: al menos uno de los coeficientes del modelo es diferente de cero

El criterio de decisión para esta prueba de hipótesis es el siguiente:

Si el valor p de la regresión es menor que α rechazo H_0 .

Dado que el valor p es 0, y es menor que 0,01 (ó 1%) entonces se rechaza H_0 , y se concluye que con un 99% de confiabilidad existe evidencia para afirmar que al menos uno de los coeficientes del modelo es diferente de cero. Por lo tanto el modelo es significativo.

Significancia de los coeficientes

Para probar la significancia de los coeficientes del modelo se plantea una prueba de hipótesis para cada uno:

Prueba para β_1

$H_0: \beta_1 = 0$

$H_a: \beta_1 \neq 0$

Prueba para β_2

$H_0: \beta_2 = 0$

$H_a: \beta_2 \neq 0$

El criterio de decisión para esta prueba de hipótesis es el siguiente:

Si el valor p del coeficiente es menor que α rechazo H_0 .

Dado que como se muestra en la tabla 5 el valor p de ambos coeficiente es respectivamente 4.7979×10^{-128} y 1.6880×10^{-36} , esto indica que en ambos casos se rechaza H_0 . Se concluye entonces que con un 99.5 de confianza existe evidencia para afirmar que ambos coeficientes son diferentes de cero, es decir son significativos para el modelo.

Supuesto de normalidad:

Este supuesto busca demostrar que los residuos o errores del modelo se distribuyen de forma normal, por lo que se plantea la siguiente prueba de hipótesis:

H_0 : los residuos siguen un comportamiento normal

H_a : los residuos NO siguen un comportamiento normal

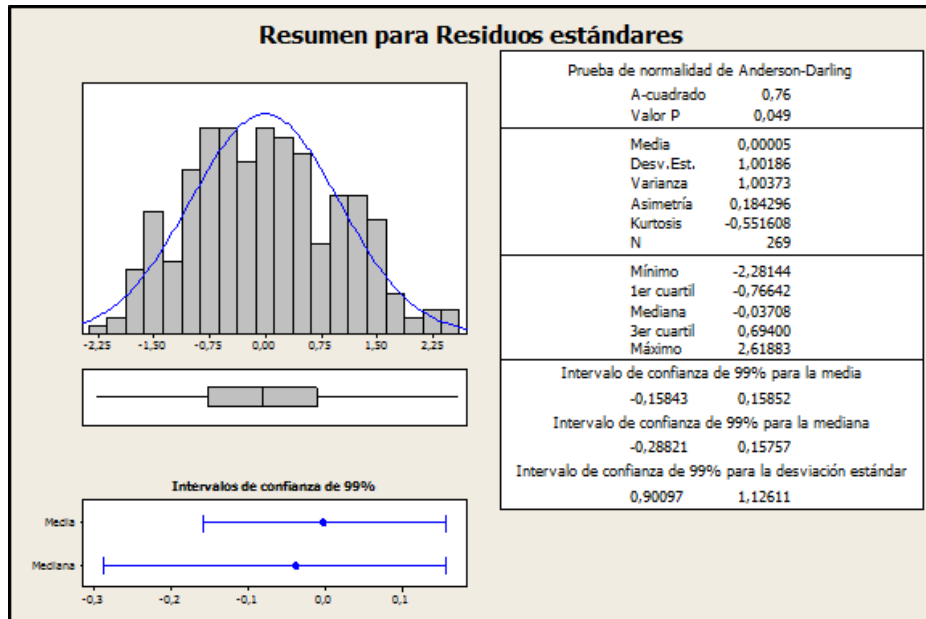
El criterio de decisión para esta prueba de hipótesis es el siguiente:

Si el valor p de los residuos es menor que α rechazo H_0 .

El valor p de los residuos se obtiene del resumen estadístico de gráfico en Minitab®16 que se muestra en el gráfico 16. Dado que el valor p (0,049) es mayor que α (0,01) no se rechaza H_0 , y se concluye con un 99% de confiabilidad que no

existe evidencia para afirmar los residuos NO siguen un comportamiento normal. Por tanto, el modelo cumple el supuesto de normalidad.

Gráfico 16. Resumen de gráfico de residuos estándares



Fuente: La Autora

Supuesto de igualdad de varianzas:

Este validar este supuesto se plantea la siguiente prueba de hipótesis:

Ho: Las varianzas de los residuos son iguales

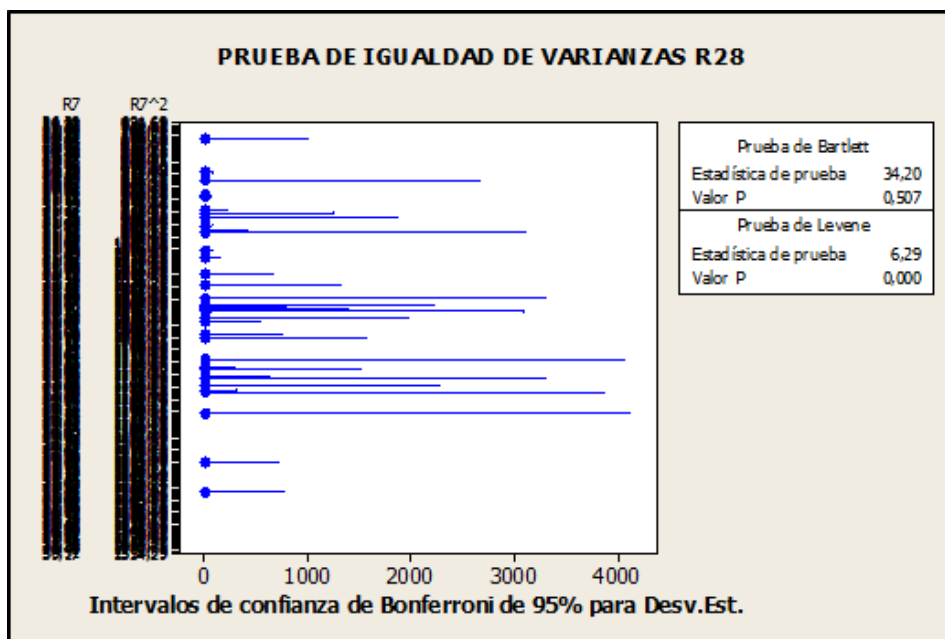
Ha: Las varianzas de los residuos son diferentes

El criterio de decisión para esta prueba de hipótesis es el siguiente:

Si el valor p es menor que α rechazo Ho.

Para determinar este valor p se realizó en Minitab®16 una prueba de igualdad de varianzas para R28, expuesta en el gráfico 17. Dado que el valor p (0,507) es mayor que α no rechazo Ho, y por tanto se concluye que con un 99% de confiabilidad no existe evidencia para afirmar que las varianzas de los residuos son diferentes. Lo anterior implica que el modelo cumple el supuesto de igualdad de varianzas.

Gráfico 17. Prueba de igualdad de varianzas para R28



Fuente: La Autora

Supuesto de aleatoriedad e independencia:

Este supuesto busca asegurar que los residuos sean aleatorios e independientes, por lo que se establece la siguiente prueba de hipótesis:

H_0 : los residuos son aleatorios e independiente

H_a : los residuos no son aleatorios ni independientes.

El criterio de decisión para esta prueba es el siguiente: se rechaza H_0 si el valor de Durbin Watson es menor que el valor dL tomado de la tabla de Durbin Watson.

Dado que dL equivale a 1,653 y el estadístico de Durbin Watson es 1,669, no se rechaza H_0 . Por tanto se concluye que con un 99% de confiabilidad no existe evidencia para afirmar que los residuos no son aleatorios ni independientes. Entonces el modelo cumple el supuesto de aleatoriedad e independencia.

Dado que el modelo cumple todos los supuestos, se concluye que la inferencia estadística es válida, y que el modelo es insesgado y eficiente.

Una vez validados los supuestos se procede a verificar el modelo como predictor. Esta validación de predicción se realizó a partir del calculo de los errores: EM (error medio), DAM (desviación absoluta media), ECM (error cuadrático medio) y

EPAM (Error porcentual absoluto medio). Los resultados obtenidos se exponen en la tabla 15.

Tabla 15. Errores del modelo polinómico sin intercepto entre R7 y R28

ERRORES	
EM	0,20
ECM	2,70
DAM	1,19
EPAM	2,82%

Fuente: La Autora

Estos indicadores tienen valores muy reducidos por lo que se puede concluir que el modelo resulta adecuado para estimar R28. Sin embargo, como el objetivo del proyecto es anticipar al máximo el valor de la resistencia a 28 días se procede a evaluar otras técnicas y modelos diferentes a la regresión para estimar R28.

5.2.1.2 Redes Neuronales

Las redes neuronales son una herramienta capaz de recibir muchas variables de entrada, interconectarlas hasta lograr la mayor cantidad de conexiones para lograr la mejor precisión de las variables respuesta, siempre tratando de imitar el comportamiento neuronal de los seres vivos. Con la ayuda de la tecnología se han construido software de gran capacidad, que agilizan la creación de las redes neuronales.

Sin embargo los software para redes neuronales tienen la limitación de su difícil acceso. Además, por no ser un elemento común en la industria, implementar el uso de uno de estos software implicaría forzar a la industria a adquirir las licencias e incurrir en costos tecnológicos que posiblemente no se este dispuesto a asumir.

Adicionalmente, las redes neuronales requieren de personas capacitadas que puedan ajustarlas y re-entrenarlas cuando alguna de sus variables de entradas se vean alteras con el paso del tiempo. Este requerimiento de personal capacitado es actualmente una limitante para la aplicación de esta herramienta en diferentes modelos.

Por las razones anteriores, se decidió no trabajar con redes neuronales para el desarrollo del proyecto.

5.2.1.3 Análisis de componentes principales

Como ya se mencionó en el marco teórico, el análisis de componentes principales tiene como objetivo sintetizar la información, mediante la reducción del número de variables con que se busca analizar un resultado, perdiendo la menor cantidad posible de información.

Dado que el proyecto busca estimar la resistencia a 28 días a partir de las resistencias tempranas (1, 3 y 7 días), las variables con las que se trabaja para realizar la estimación son máximo 3. Por tanto no se justifica realizar una reducción del número de variables mediante la aplicación del análisis de componentes principales. En consecuencia, se decidió no trabajar con este elemento para el desarrollo del proyecto.

5.2.1.4 Series de Tiempo

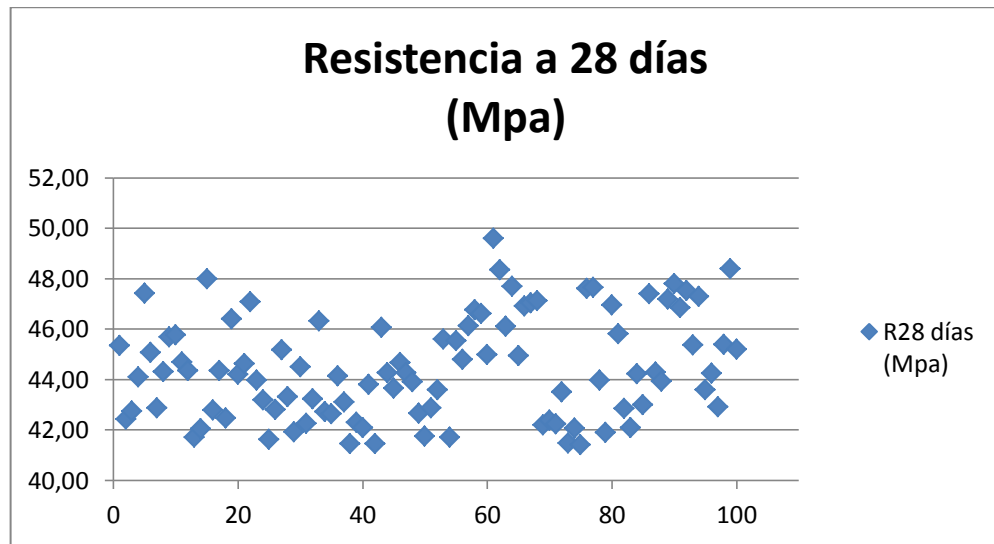
Tal como se mencionó en el marco teórico, se tiene una serie de tiempo cuando se cuenta con datos estadísticos recopilados en tiempos regulares, y se busca pronosticar el valor futuro de esa variable. Por tanto las series de tiempo parten del supuesto de que la historia de la variable sirve para expresarse a si misma en el futuro.

Para verificar si la resistencia se podría enmarcar dentro del concepto de serie de tiempo se validaron las tres características con las que debería cumplir:

1. La base de tiempo debe ser única
La resistencia si cumple esta característica, pues maneja a lo largo de la serie un mismo periodo de tiempo, que viene dado en días. Este periodo esta determinado por la frecuencia de las muestras tomadas para el ensayo de resistencia a la compresión, que es el promedio día.
2. La serie de tiempo debe ser consecutiva
La condición que se cumple dado que para cada periodo (día) se realiza una observación.
3. Cualquier dato de la serie se debe explica por el comportamiento de los datos anteriores de la serie.
Esta condición no se cumple para la resistencia a 3, 7 y 28 días, pues se observa que estos valores no se explican a partir de sus valores anteriores. Por el contrario, la resistencia a 28 días depende de la resistencia a 1, 3 y 7 días de ese mismo lote, la resistencia a 7 días depende de la resistencia a 1 y 3 días, y la resistencia a 3 días depende de la resistencia a 1 día.

En conclusión se tiene que las resistencias por si solas no se pueden representar como series de tiempo, pues el valor de la resistencia a 28 días depende del valor que toman las resistencias tempranas y no el histórico de sus valores. Gráficamente se puede observar que no se observan características de series de datos en la resistencia en el gráfico 18.

Gráfico 18. Primeras 100 observaciones de la resistencia para 2011



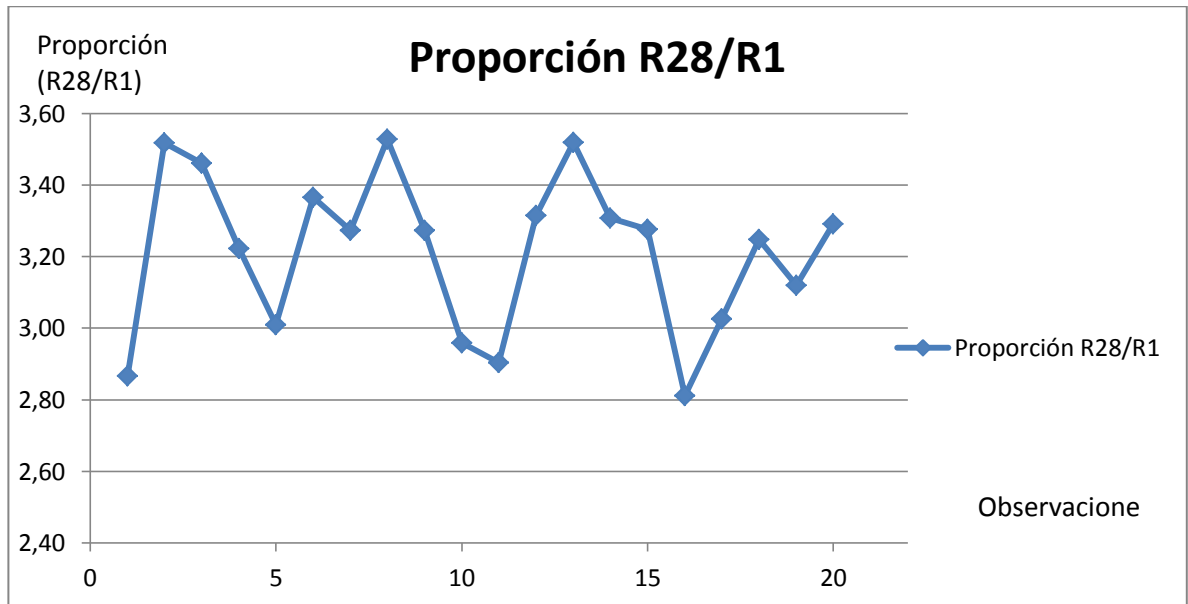
Fuente: La Autora

El gráfico 18 evidencia que el valor de la resistencia de un día no se explica por el valor del día anterior. Sin embargo, no se descarta que por motivos tales como cambios en las materias primas o decisiones en mezcla, esta variable presente algunas tendencias. No obstante, este comportamiento no es característico de las series de tiempo.

Sin embargo existe una forma de lograr identificar una serie de tiempo a partir de las resistencias, y esta es a partir del incremento que tiene la resistencia a 28 días con respecto a la de 1 día. Esto quiere decir, que a pesar de que las resistencias por si solas no se comporten como una serie de tiempo, la proporción R_{28}/R_1 , y la diferencia $(R_{28}-R_1)$ si se comporta como una serie de tiempo.

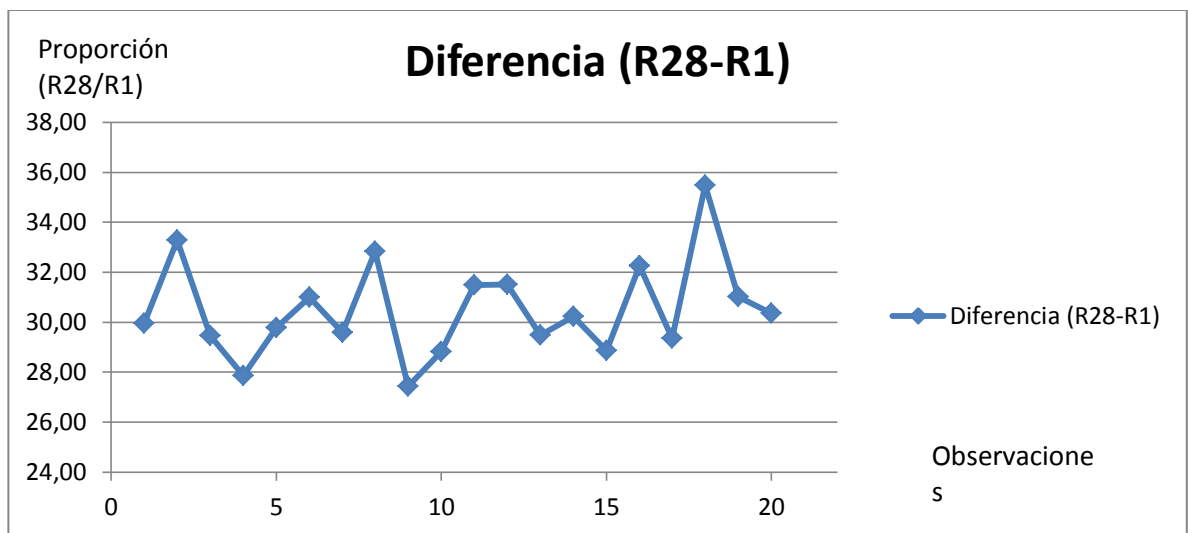
Estas dos nuevas variables cumplen las tres características de una serie de tiempo, pues tienen una base de tiempo única, representada por los días de muestreo. También cuentan con valores consecutivos, y por último su valor se puede explicar a partir de sus datos históricos. Los gráficos 19 y 20 muestran la proporción (R_{28}/R_1) y la diferencia $(R_{28}-R_1)$ para 20 observaciones de 2011, respectivamente.

Gráfico 19. Proporción (R28/R1) para 20 observaciones de 2011



Fuente: La Autora

Gráfico 20. Diferencia (R28-R1) para 20 observaciones de 2011



Fuente: La Autora

Estas variables permiten usar los métodos de pronósticos de suavizamiento exponencial, para estimar el incremento que tendrá R28 a partir de R1. Este valor pronosticado de incremento, sea por proporción o diferencia, se emplea para

estimar la R28, mediante el producto entre la R1 conocida y el incremento pronosticado.

5.2.2 Método para estimar la resistencia a la compresión a 28 días

El proceso realizado para la identificación del método adecuado y la variable adecuada fue el siguiente:

A. Analizar cuál es la mejor forma de estimar R28

Como ya se mencionó, para estimar la resistencia a 28 días se propusieron dos variables que representarían el crecimiento o incremento que tiene R28 con respecto a R1:

- a. Proporciones: $R28/R1$
- b. Diferencia: $R28-R1$

Por lo que se procedió a decidir cuál de las dos variables, sujetas a métodos de pronósticos representan una menor variabilidad como modelo.

Dado que ninguna de estas dos variables muestra estacionalidad, ver gráficos 19 y 10, se procedió a evaluar los métodos de suavizamiento exponencial simple (SES) y doble (SED) para cada variable.

Para estos modelos se tomó una ventana de tiempo de 300 datos, que en fechas corresponden a un periodo entre el 3 de enero y el 2 de diciembre de 2011. Se inicializaron los modelos solo con el primer dato, dado que su efecto carecía de importancia para un periodo de 300 datos.

Se inició el análisis para la variable proporción, y se realizó la prueba de tendencia que consiste en el cociente entre la diferencia del pronóstico del último y el primero de los datos, y el promedio de dichos datos. El resultado de esta prueba de tendencia indicó que la variable proporción presenta tendencia por lo el método adecuado era la SED, sin embargo para efectos del proyecto se realizó evaluación tanto del SED como del SES.

Método de SED para la proporción R28/R1

Para este modelo se trabajó con las siguientes ecuaciones:

$$S_T = \alpha P_T + (1 - \alpha)(S_{T-1} + B_{T-1}) \quad \text{Ec. 5.10}$$

$$B_T = \beta(S_T - S_{T-1}) + (1 - \beta) B_{T-1} \quad \text{Ec. 5.11}$$

$$F_{T,t+\tau} = S_t + G_t \quad \text{Ec. 5.12}$$

Donde S representa el valor de la serie para el periodo T, P es la variable proporción (R28/R1), B es el valor de la pendiente en el periodo T, y α y β son los coeficientes de la serie y de la tendencia, respectivamente.

El modelo se inicializó a partir del primer valor, asumiendo entonces un nivel de serie (S_T) igual a la proporción inicial, para este caso la proporción del 2 de enero, y un nivel de tendencia (B_T) igual a cero. Para determinar los coeficientes de suavizamiento se realizó un proceso de minimización de la desviación absoluta media (DAM) en Solver, obteniendo un α (suavizamiento de la serie) de 0,272 y un β (suavizamiento de la tendencia) de 0,00.

Con este modelo, se obtuvo una DAM de 0,223 y un error porcentual absoluto medio (EPAM) de 6,26%. La tabla 16 muestra el resumen de los parámetros y resultados obtenidos en con este modelo.

Tabla 16. Parámetros y resultados del modelo para proporción con SED

Parámetros del modelo		Errores		Desviación	
α	0,27212148	EM	-0,00864543	σ	0,27915305
β	0	DAM	0,22332244		
		ECM	0,08006192		
		EPAM	6,264%		

Fuente: La Autora

Método de SES para la proporción R28/R1

Retomando las ecuaciones descritas en el marco teórico para el SES, se utilizó el siguiente modelo:

$$S_T = \alpha P_T + (1 - \alpha)S_{T-1} \quad \text{Ec. 5.13}$$

$$F_{T+1} = S_T \quad \text{Ec. 5.14}$$

$$F_{T+\tau} = F_{T+1} = S_T \quad \text{Ec. 5.15}$$

Donde S es la estimación de la serie, Pt es la proporción (R28/R1), α es el coeficiente de suavizamiento de la serie, y $F_{(T+1)}$ es el pronóstico para el día siguiente, que para el SES es equivalente al pronóstico de cualquier día que le preceda: $F_{(T+t)}$.

Para la inicialización se tomo un S_0 igual al primer valor de la serie, correspondiente para este caso al 3 de enero de 2011. Para determinar el α se realizó, al igual que en el modelo SED una optimización en la que se minimizaba la desviación absoluta media (DAM), para cambiar el valor de α , que debe estar entre 0 y 1. De esta forma se obtuvo un valor para α igual a 0,2721.

Con las condiciones ya descritas se obtuvieron los resultados del modelo expuestos en la tabla 17. Los errores para este modelo son muy similares a los obtenidos en el modelo SED.

Tabla 17. Parámetros y resultados del modelo para proporción con SES

Parámetros del modelo		Errores		Desviación	
α	0,27212152	EM	-0,00864543	σ	0,27915304752
		DAM	0,22332244		
		ECM	0,08006192		
		EPAM	6,264037%		

Fuente: La Autora

Método de SES para la diferencia R28-R1

Al igual que se realizó para la variable proporción, se realizó para la diferencia (R28-R1) la prueba de tendencia, que indicó que el modelo mas adecuado para realizar pronósticos es el SES, debido a que su tendencia no es significativa. Las ecuaciones planteadas para este modelo fueron las siguientes:

$$S_T = \alpha D_T + (1 - \alpha)S_{T-1} \quad \text{Ec. 5.16}$$

$$F_{T+1} = S_T \quad \text{Ec. 5.17}$$

$$F_{T+\tau} = F_{T+1} = S_T \quad \text{Ec. 5.18}$$

Donde, como ya se definió anteriormente, S_T es la estimación de la serie, D_T g es el valor de la variable diferencia en el periodo T, α es le coeficiente de suavizamiento, y $F_{(T+1)}$ es el pronóstico de un periodo adelante.

La inicialización al igual que en todos los modelos anteriores se realizó a partir del primer dato de la serie. El valor de α se obtuvo a partir de la optimización con Solver, de la misma forma como se realizó en los modelos anteriores. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 18.

Tabla 18. Parámetros y resultados del modelo para diferencias con SES

Parámetros del modelo		Errores		Desviación	
α	0,17889351	EM	-0,01439932	σ	1,81100162780
		DAM	1,4488013		
		ECM	3,25606176		
		EPAM	4,59%		

Fuente: La Autora

Método de SED para la diferencia R28-R1

A pesar de los resultados obtenidos en la prueba de tendencia, que indicaron que resultaba mejor un método de SES en lugar de un método con tendencia, se evaluó la realización del método SED para esta variable: diferencia.

Para el modelo SED de la diferencia se trabajó con las siguientes ecuaciones:

$$S_T = \alpha D_T + (1 - \alpha)(S_{T-1} + B_{T-1}) \quad \text{Ec. 5.19}$$

$$B_T = \beta(S_T - S_{T-1}) + (1 - \beta) B_{T-1} \quad \text{Ec. 5.20}$$

$$F_{T,t+\tau} = S_t + G_t \quad \text{Ec. 5.21}$$

En este modelo la letra D representa el valor de la variable diferencia, para el periodo T. Las demás notaciones mantienen el significado previamente explicado.

La tabla 19 muestra los coeficientes de suavizamiento obtenidos por optimización empleados en el modelo, los errores calculados, y la desviación obtenida.

Tabla 19. Parámetros y resultados del modelo para diferencias con SED

Parámetros del modelo		Errores		Desviación	
α	0,17889351	EM	-0,01439923	σ	1,81100162928
		DAM	1,4488013		
		ECM	3,25606147		
		EPAM	4,59%		

Fuente: La Autora

B. Comparación entre los cuatro modelos anteriores

Para poder decidir cuál de los cuatro modelos alternativos, y cuál de las dos variables, resultan mejores como método de pronóstico, se procedió a comprar la variabilidad de las alternativas; por tanto el método que presentase menor variabilidad sería el más indicado. (La variabilidad se calcula con σ ó desviación estándar, proveniente de $1,25 \cdot \text{MAD}$ debido a la normalidad de los errores en los modelos).

Dado que se estaban comparando variaciones σ que no correspondían a series iguales, entonces se calculó el coeficiente de variación (CV) para poder compararlos y tomar una decisión sobre cual tenía menor variación. Ver comparación en tabla 20.

Tabla 20. Comparación de modelos

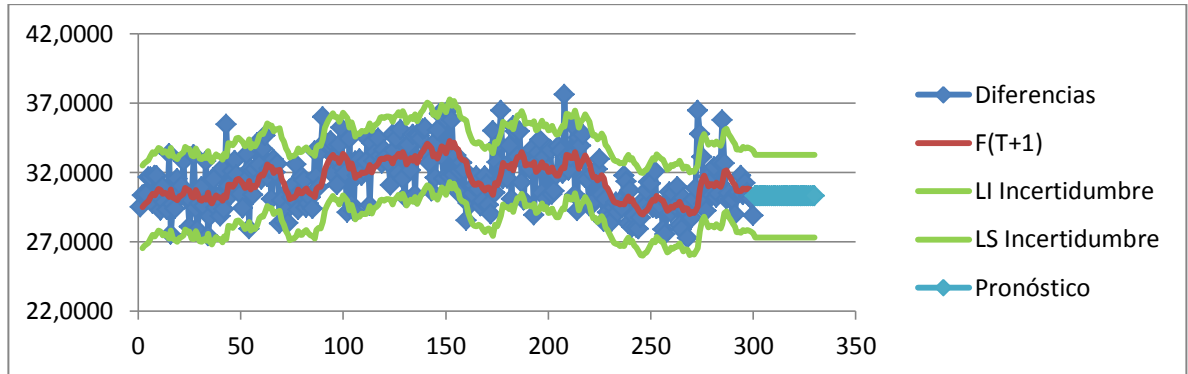
PROMEDIO PROPORCIÓN	3,65733038		
PROMEDIO DIFERENCIA	31,704682		
MÉTODO	DAM	Σ	CV
Proporción SED	0,22332244	0,27915305	7,632699764%
Proporción SES	0,22332244	0,27915305	7,632699763%
Diferencia SES	1,4488013	1,81100163	5,712095224%
Diferencia SED	1,4488013	1,81100163	5,712095229%
		Mínimo	5,712095224%

Fuente: La Autora

Como se evidencia en la tabla 18, el mejor que presenta menor variación es el de la diferencia mediante el método de SES.

El Gráfico 21 muestra los resultados para el modelo de la diferencia por SES, especifica la simulación (F_{T+1}), los límites de incertidumbre de dicho modelo, la serie de datos o diferencia (R28-R1), y el pronóstico.

Gráfico 21. Modelo de la diferencia por SES



Fuente: La Autora

Una vez seleccionada la diferencia como variable para representar el incremento que tiene la resistencia a 28 días con respecto a la resistencia a 1 día, resulta importante resaltar que esta variable solo se conoce hasta 28 días antes la fecha actual. Es decir, que si hoy es el día 0, la variable diferencia solo se conoce para el día -28 (hace 28 días), por lo que para conocer el pronóstico de la diferencia para el día 0, se hace un pronóstico con los datos hasta hace 28 días, proyectados para 28 días después, esto es: $F_{(T+28)}$, que como ya se mostró en las ecuaciones del modelo $F_{(T+28)}=F_{(T+1)}$.

C. Estimación de R28

Conocido el pronóstico de la diferencia, se buscó entonces estimar la resistencia a 28 días, por tanto se planteó un modelo que consiste en el producto entre el pronóstico de la diferencia, y el valor de la resistencia a 1 día de la muestra para la que se desea conocer la R28. El modelo es el siguiente:

$$\widehat{R28}_t = D_t \times R1_t \quad \text{Ec. 5.22}$$

Donde $R28_t$, es el valor estimado de la resistencia a 28 días del cemento despachado el día t, D_t es el valor pronosticado de la diferencia para el cemento

despachado el día t, y R_{1t} es la resistencia a 1 día del cemento despachado el día t.

D. Cálculo del error e intervalos de predicción

Con el objetivo de crear indicadores sobre que tan bueno es el modelo en cuanto de su proximidad con el valor real estimado se calculó tanto para el pronóstico con SES de la diferencia, como para la estimación de R28, los errores: EM (error medio), DAM (desviación absoluta media), ECM (error cuadrático medio), EPAM (error porcentual absoluto medio). Ver Tabla 21 con resultados de los errores.

Tabla 21. Errores del modelo

ERRORES PARA EL PRONÓSTICO DE LA DIFERENCIA		ERRORES PARA LA ESTIMACIÓN DE R28	
EM	-0,0346	EM	0,0214
DAM	1,4678	DAM	1,8647
ECM	3,3168	ECM	5,0944
EPAM	4,647%	EPAM	4,257%

Fuente: La Autora

Estos valores de los errores calculados para el modelo en cada una de sus faces: pronóstico de la diferencia y estimación de R28, indican que el error es controlado. En promedio, la diferencia se aleja 1,47 MPa del valor real, y la estimación de R28 se aleja en promedio 1,86 Mpa del valor real de la resistencia a 28 días (R28). Así mismo, el error cuadrático medio (ECM), que es quien castiga los valores altos de los errores, indica que en general no se presentan errores con grandes magnitudes en ninguna de las fases del modelo.

Adicionalmente, se calcularon los límites de incertidumbre para ambos modelos, que vienen dados por la formula:

$$LI \text{ Incertidumbre} = F_{(T+1)} - z\sigma \quad \text{Ec. 5.23}$$

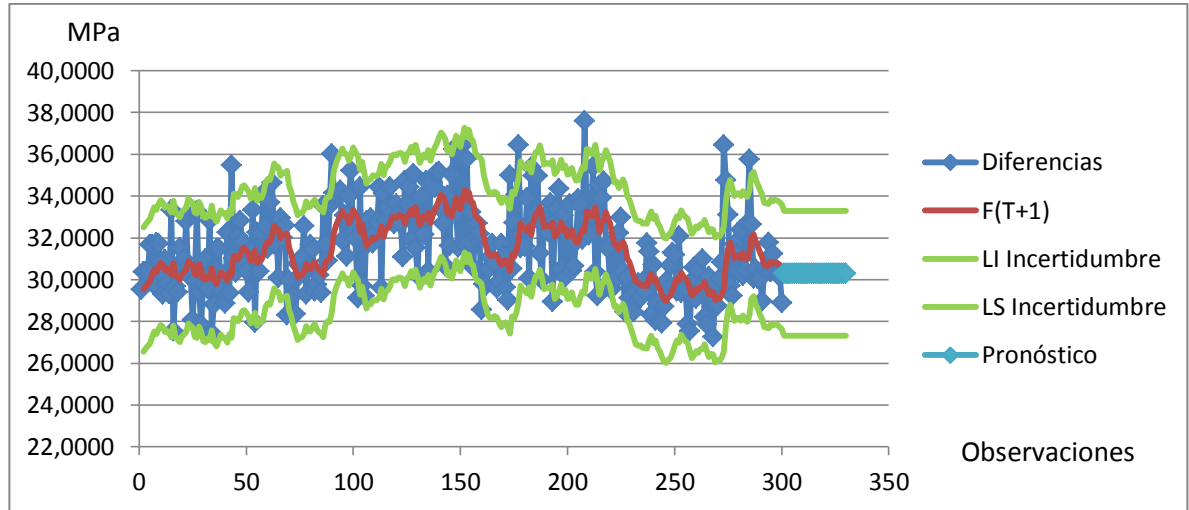
$$LS \text{ Incertidumbre} = F_{(T+1)} + z\sigma \quad \text{Ec. 5.24}$$

Donde Z es el valor estandarizado de la distribución normal inversa, que para una confiabilidad del 95% es equivalente a 1,64. $F_{(T+1)}$ es el pronóstico de la diferencia para el periodo T+1, y σ es la desviación, estimada como $1,25 \cdot DAM$, debido a la normalidad de los errores. De no ser normales los errores la desviación resulta equivalente a la raíz cuadrada del ECM.

Los gráficos 22 y 23 muestran la los modelos de pronostico de la diferencia y estimación de R28, respectivamente. Cada grafico muestra sus límites de

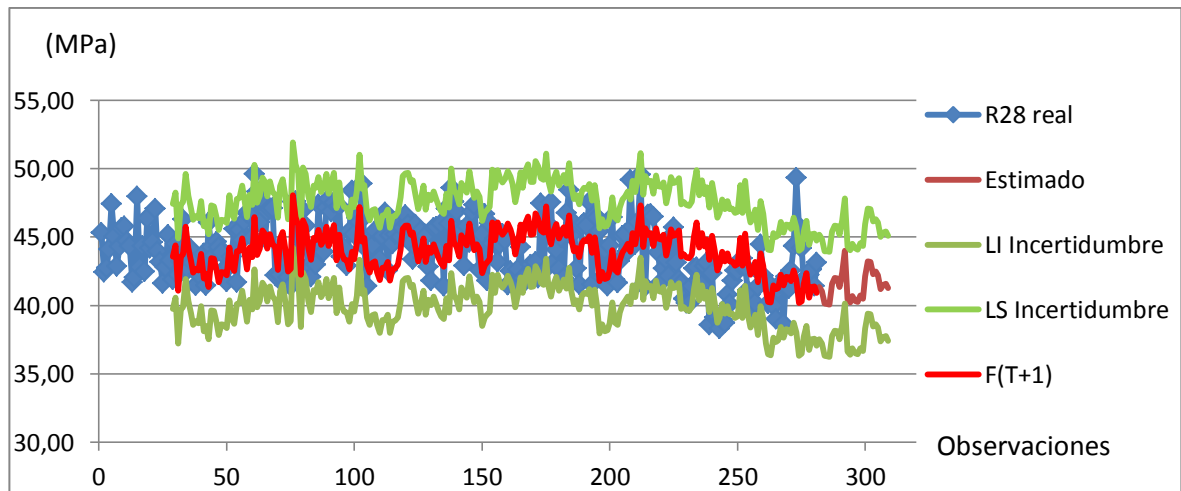
incertidumbre, superior e inferior, el valor real de la variable, la simulación (F_{T+1}) y el pronóstico o estimación.

Gráfico 22. Pronóstico de la Diferencia



Fuente: La Autora

Gráfico 23. Estimación de la resistencia a 28 días (R28)



Fuente: La Autora

5.2.3. Resumen del modelo final de estimación de la resistencia a la compresión a 28 días

El análisis anterior mostró el proceso por el que se llegó al modelo final de estimación de la resistencia a 28 días. En este apartado se extrae únicamente el modelo final, excluyendo variables y métodos evaluados pero no aplicados finalmente. Esta metodología fue la implementada como herramienta en Excel, cuyo archivo se adjunta en la entrega, y cuyo manual de usuario se encuentra en el Anexo C.

El modelo final consiste en los siguientes pasos:

1. A partir de los datos históricos se calcula una variable llamada *diferencia*, que representa la diferencia o incremento entre la resistencia a 28 días (R28) y la resistencia a 1 día (R1), que es equivalente a la expresión: $R28 - R1$.
2. A esta variable *diferencia* se le aplica el método de pronósticos: suavizamiento exponencial simple, para el que se calculan los errores del modelo, y el coeficiente de suavizamiento (α), que se optimiza mediante la minimización de los errores cada vez que se conoce un nuevo valor.
3. Usando el pronóstico de la *diferencia* se procede a estimar la resistencia a la compresión a 28 días (R28), mediante el producto entre el valor real de la resistencia a la compresión a 1 día (R1) y el pronóstico de la *diferencia*.

Resulta importante indicar que tanto para los errores del pronóstico de la *diferencia*, como para los errores de la estimación de la resistencia, el modelo evalúa la normalidad de los mismos mediante la prueba de kolmogorov-smirnov. Con estos resultados de normalidad se calcula la desviación de dichas variables (*diferencia* y resistencia a 28 días) con 1,25DAM, si se comporta normalmente, o con la raíz cuadrada del ECM, de no ser norma. Estas desviaciones son usadas para el cálculo de los límites de incertidumbre de cada modelo.

Adicionalmente esta estimación de la desviación de la resistencia se usa como control del valor del cálculo tradicional de la desviación estándar, pues presenta un mejor ajuste.

5.3 METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR LAS ACCIONES A TOMAR Y AJUSTAR LOS PARÁMETROS DEL PROCESO

Partiendo de la realidad de que la Empresa XYZ conoce su proceso, su producto, y las acciones a tomar, pero que carece de un ajuste rápido en su reacción debido a una respuesta lenta que tienen al manejar 28 días de espera para los ensayos de resistencia, la metodología consiste en una serie de alertas basadas en la estimación de la resistencia a 28 días.

Con respecto a los datos históricos de la resistencia a 28 días, se sabe que la resistencia promedio a 28 días es de 43,76 MPa, con una desviación estándar de 2,27 MPa. Con respecto a la NTC 121, se sabe que la especificación inferior para dicha resistencia es de 41,4 MPa. La tabla 22 resume estos valores.

Tabla 22. Valores de referencia para la resistencia a 28 días

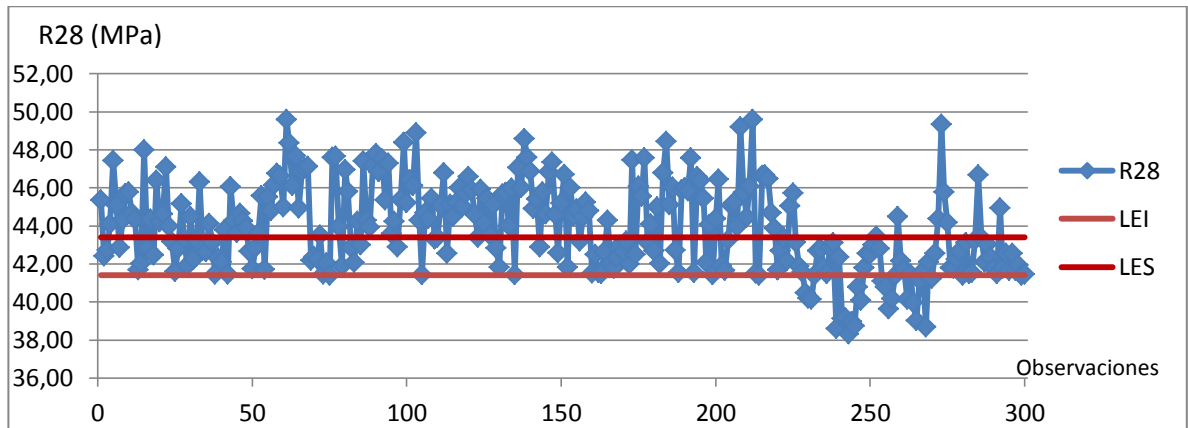
MEDIA (MPa)	43,76
DESVIACIÓN (MPa)	2,27
LIMITE DE ESPECIFICACIÓN INFERIOR LES (MPa)	41,40

Fuente: La Autora

A pesar de que la norma no especifica un nivel superior para la resistencia, internamente en la empresa se conoce que a partir de 2 MPa sobre la especificación se está perdiendo dinero por sobre especificación de producto. Esto equivale a decir que en un horizonte ideal la empresa no debería entregar cemento concreto con resistencia superior a 43,1 MPa. Sin embargo, al graficar algunos datos históricos con una especificación superior equivalente a 43,1 MPa se observa que este no es un límite razonable dado que se encuentra por debajo de la media de la resistencia a la compresión a 28 días, que como ya se indicó es de 43,76 MPa. Ver gráfico 24.

Una especificación superior con un valor menor a la media es inadecuada para establecerse como nivel de alarma, pues no permitiría ir ajustando el proceso, sino que informaría alarma para cualquier valor estimado de la resistencia.

Gráfico 24. Resistencia a la compresión con límites ideales de especificación



Fuente: La Autora

Por lo anterior, se decidió establecer inicialmente como límite superior de especificación un valor acorde con la capacidad de proceso de la resistencia a la compresión a 28 días. Por tanto, recordando los resultados de análisis de capacidad previamente expuestos, se tiene que la capacidad de proceso con respecto a la especificación superior viene dada por la ecuación:

$$C_{pi} = \frac{\mu - EI}{3\sigma} \quad \text{Ec. 5.25}$$

Remplazando los valores de la tabla 11 en esta ecuación se tiene un Cpi de 0,35. A partir del Cpi, y asumiendo un proceso centrado con respecto a las especificaciones, para la que el Cpi es igual al Cps (capacidad de proceso estimada a partir del cumplimiento de la especificación superior) se calcula el límite superior de la siguiente forma:

$$C_{ps} = \frac{ES - \mu}{3\sigma} \quad \text{Ec. 5.26}$$

$$ES = \mu + (C_{ps}3\sigma) \quad \text{Ec. 5.27}$$

$$ES = \mu + (C_{pi}3\sigma) \quad \text{Ec. 5.28}$$

Remplazando en esta última ecuación los valores ya conocidos, se tiene que la especificación superior debe ser de 46,12 MPa.

De igual forma, para evaluar este cálculo del límite de especificación superior, se planteó que para iniciar con un valor acorde con el proceso, se debía mantener en la parte superior la misma amplitud que se tiene en la inferior. Es decir,

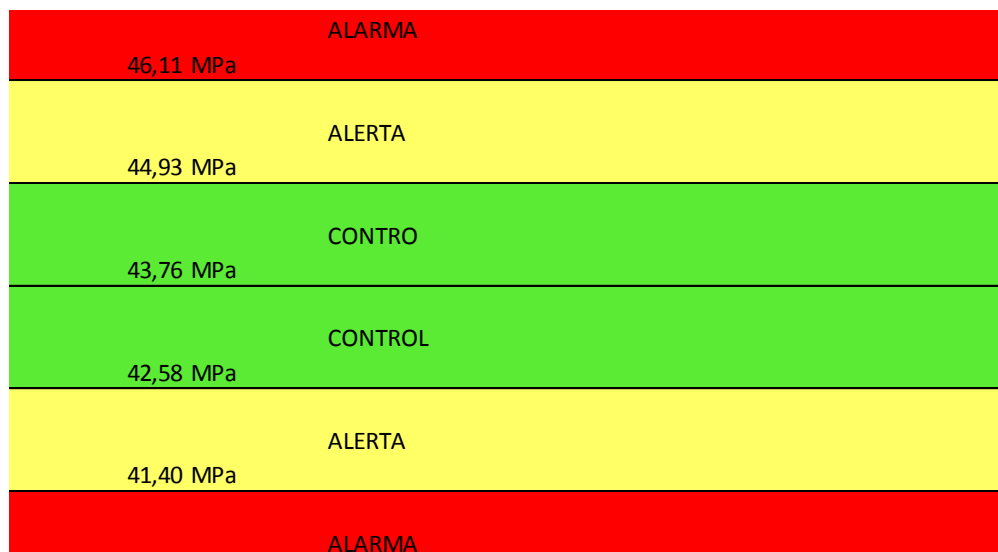
inferiormente, se tiene una amplitud de (media - LEI = 43,76 - 41,4 = 2,36) 2,36 MPa, por tanto siguiendo con la idea de un proceso centrado, se debería tener la misma la misma diferencia entre la media y la especificación superior. Por tanto, la especificación superior es de (43,757 + 2,357 = 46,11) 46,11 MPa.

Tomando entonces inicialmente 46,11 MPa como limite de especificación superior, se procedió a aplicar la teoría de cartas de pre-control descrita en el marco teórico.

La aplicación de la técnica de pre-control inicia con la estimación del rango existente entre las especificaciones (LES - LEI = 46,11 - 41,4 = 4,71 MPa) es de 4,71 MPa. Posteriormente, se procede a dividir este rango en cuatro partes iguales (4,71/4 = 1,178 MPa). Por tanto para ir determinando los límites de control, alertas y alarmas se suma a la especificación inferior 1,178 MPa, obteniendo un valor de 42,58 MPa. Se continúa sumando a 42,58 MPa los 1,178 MPa de incremento, para obtener un valor de 43,76 MPa, equivalentes a la media del proceso. Luego se suma a la media de nuevo el 1,178 MPa, para obtener 44,93 MPa, y finalmente se obtiene al sumar de nuevo el incremento un valor de 46,11 MPa equivalentes a la especificación superior.

Estos valores se resumen en el gráfico 25, en donde se muestran siguiendo los colores del semáforo planteado por la teoría de las cartas de pre-control.

Gráfico 25. Semáforo de alertas y alarmas para la resistencia a 28 días



Fuente: La Autora

Con los niveles de control ya establecidos se pretende que para cada estimación de la resistencia a 28 días que arroje el modelo, se identifique si el proceso se encuentra en control, alerta o alarma.

1. CONTROL

Se estimará que la resistencia está en control cuando su valor se encuentre entre 42,58 y 44,93 MPa. Para este caso se indica que se estima que la resistencia a 28 días está controlada y que por tanto no es necesario ajustar el proceso.

2. ALERTA

Se estima que la resistencia se encuentra en un nivel de alerta cuando su valor esta entre 41,4 y 42,58 MPa o entre 44,93 y 46,11 MPa. Para este caso se indica que es posible que la resistencia esté muy cerca a los límites de especificación y por lo tanto se debe intervenir el proceso.

La intervención puede requerir una manipulación de las variables de acción rápida, como la finura, y el porcentaje de adición, para aumentar o reducir la resistencia, dependiendo del límite al que se esté acercando.

3. ALARMA

Se indica alarma cuando el estimado de la resistencia a 28 días indica que el valor será menor que 41,4 MPa o mayor que 46,11MPa.

Para el caso de la alarma por especificación inferior la empresa tiene la posibilidad de alterar futuros despachos mediante mezclas de diferentes silos de cemento con el objetivo de no continuar despachando producto fuera de especificaciones o producto no conforme. Además, una señal de alarma indica revisar las variables de acción lenta, como son las materias primas y ajuste de parámetros en la producción del clinker.

De igual forma una alarma por sobrepasar la especificación superior (por el momento con valor temporal) debe indicar que se esta entregando calidad al producto por la que el cliente no esta pagando, y por tanto también se debe ajustar el proceso.

Con estos niveles de alerta y alarma, y con la estimación de la resistencia a 28 días a partir de la resistencia a 1 día, se logra que esta empresa que ya conoce sus variables de ajuste y el comportamiento de su proceso tenga una reacción más oportuna y ágil ante una variación en la resistencia.

6. CONCLUSIONES

- La resistencia a la compresión es la característica de calidad más importante para el cemento concretero. Esta característica solo puede ser medida una vez el producto está completamente terminado y su proceso de medición implica un periodo de 28 días. Por tal razón, resulta de gran importancia identificar métodos, modelos y ecuaciones para anticiparse a dicho valor.
- La resistencia a la compresión a 28 días propiamente no se comporta como una serie de tiempo, dado que su valor futuro no depende de sus valores históricos. Por el contrario, la resistencia a 28 días depende de las resistencias tempranas de dicho cemento analizado. Sin embargo, el incremento que tiene la resistencia a 28 días con respecto a la resistencia a 1 día sí se comporta como una serie de tiempo, puesto que ésta puede explicarse mediante sus datos históricos.
- Dado que el incremento que presenta la resistencia a 28 días a partir de la resistencia a 1 día se comporta como una serie de tiempo, se emplearon, en la metodología para anticipar la resistencia a 28 días, elementos de pronósticos aplicados a la nueva variable que representa el incremento entre las resistencias.
- Las cartas de pre-control son una técnica de control de calidad que tiene como objetivo evitar la recurrencia de defectos o eventos negativos en un proceso. El concepto de pre-control aplicado en el proyecto permitió generar los niveles de alerta y alarma necesarios para indicar ante una nueva estimación de la resistencia a 28 días si la variable se encontraba en control, alerta o alarma.

7. RECOMENDACIONES

- Con el objetivo de ofrecer un nivel de servicio del 95% de las veces, y teniendo en cuenta la desviación actual de cada una de las resistencias, y asumiendo las condiciones actuales del proceso (sin alterarlas) se recomienda elevar el promedio de las resistencias de la siguiente manera:
 1. La resistencia a 1 día debería pasar de un promedio de 12,34 MPa a 13,14 MPa
 2. La resistencia a 3 día debería pasar de un promedio de 24,49 MPa a 24,68 MPa
 3. La resistencia a 7 día debería pasar de un promedio de 32,55 MPa a 36,41 MPa
 4. La resistencia a 28 día debería pasar de un promedio de 43,76 MPa a 45,14 MPa

- Con el objetivo de ofrecer un nivel de servicio del 95% de las veces, y teniendo en cuenta la media actual de cada una de las resistencias, y asumiendo las condiciones actuales del proceso (sin alterarlas) se recomienda reducir la variabilidad de las resistencias de la siguiente manera:
 1. La resistencia a 1 día debería pasar de una desviación estándar de 1,30 MPa a 0,82 MPa
 2. La resistencia a 3 día debería pasar de una desviación estándar de 1,63 MPa a 1,52 MPa
 3. La resistencia a 28 día debería pasar de una desviación estándar de 2,27 MPa a 1,43 MPa

- De existir la posibilidad de renegociar las especificaciones establecidas en la ficha técnica, con los clientes, pero sin dejar de tener en cuenta lo estipulado en la NTC 121, se recomendaría ajustar las especificaciones de la siguiente forma:
 - a. El límite de especificación inferior para la resistencia a 1 día debería pasar de 11 MPa a 10,1 MPa
 - b. El límite de especificación inferior para la resistencia a 3 día debería pasar de 22 MPa a 21,8 MPa
 - c. El límite de especificación inferior para la resistencia a 7 día debería pasar de 32,4 MPa a 28,5 MPa
 - d. El límite de especificación inferior para la resistencia a 28 día debería pasar de 41,4 MPa a 40 MPa

- Con el objetivo de tener mejor tiempo de reacción ante variaciones en la resistencia y de poder realizar trazabilidad en el proceso, la empresa XYZ debería implementar puntos de inspección para la resistencia a la compresión del cemento concreto en la salida de los molinos de cemento. Lo anterior dado que hasta la fecha en la empresa XYZ se mide la resistencia únicamente a partir de los despachos realizados, generando una brecha entre el proceso y el producto final, definida por los silos de almacenamiento. Estos silos tiene una capacidad aproximada de 3 días de inventario y mezclan el producto de tal forma que se dificulta la trazabilidad del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

Asociación Argentina de Mecánica Computacional: Uso de redes neuronales y ANFIS para predecir la resistencia uniaxial a compresión de hormigones de alta resistencia. Argentina. Octubre, 2007. ISSN 1413-1426.

ASTM C109/C109M-08, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens)

ASTM C1157/C1157M-11, Standard Performance Specification of Hydraulic Cement.

ASTM C150/C150M-11, Standard Specification of Portland Cement.

FELDMAN, Richard, M. y VALDEZ-FLORES, Ciriaco. Fitting distributions. En: Applied Probability and Stochastic Processes. 2 ed. Estados Unidos: 1995. p. 90 – 98.

GRAUPE, Daniel. Introduction and Role of Artificial Neural Networks. En: Artificial Neural Networks. 2 ed. Estados Unidos: World Scientific, 2007. P 1 - 4.

GUTIERRÉZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Cartas de control para variables. En: Control estadístico de calidad y seis sigma. 2 ed. México: Pablo Roig y Ana Delgado, 2009. P 208 - 210.

_____. Conceptos básicos de calidad. En: Control estadístico de calidad y seis sigma. 2 ed. México: Mc Graw Hill, 2009. P 2 - 13.

_____. Conceptos básicos de calidad. En: Control estadístico de calidad y seis sigma. 2 ed. México: Pablo Roig y Ana Delgado, 2009. P 2 - 13.

HANSEN, Bertrand L. y GHARE Prabhakar M. Análisis de la capacidad de proceso. En: Control de calidad: teoría y aplicaciones. Madrid: Juan Bravo, 1990. p. 199.

International journal of emerging trends in engineering and development: Prediction of compressive strength of concrete using neural network. Agosto, 2011, vol. 1, no 1. ISSN 2249-6149.

LARRAÑAGA, Pedro; INZA, Iñaki; y MOUJAHID, Abdelmalik. Redes Neuronales. [Citado el: 1 de marzo 2012]. Disponible en Internet: <<http://es.scribd.com/doc/39352648/t8neuronales>>

LEVINE, David M.; KREHBIEL, Timothy, C. y BERENSON, Mark L. Fundamentos de las pruebas de hipótesis. En: Estadística para administración. 4 ed. México: 2006. p. 272 – 310.

_____. Medidas numéricas descriptivas. En: Estadística para administración. 4 ed. México: 2006. p. 72 – 118.

_____. Medidas numéricas descriptivas. En: Estadística para administración. 4 ed. México: 2006. p. 72 -118.

_____. Regresión lineal simple. En: Estadística para administración. 4 ed. México: 2006. p. 409 – 464.

MONTGOMERY, Douglas. El aseguramiento de la calidad en el entorno moderno de la administración. En: Control estadístico de la calidad. México: Nicolás Grepe, 1991. p. 1 - 16.

NTC 121:1982, Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Físicas y Mecánicas.

QUINTERO, Fredy A. y JIMENEZ Diego, F. Predicción de la resistencia a la compresión del cemento a 28 días utilizando redes neuronales artificiales. Tesis maestría en ingeniería de sistemas. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 2001.

SIPPER, Daniel y BULFIN, Robert, L. Pronósticos. En: Planeación y control de la producción. 2 ed. México: Marcia González Osuna y Silvana Hernández García, 1998. P 122.

_____. Pronósticos. En: Planeación y control de la producción. 2 ed. México: Marcia González Osuna y Silvana Hernández García, 1998. p. 127.

TERRADEZ, Manuel. Análisis de componentes principales [en línea]. [Citado el 3 de Marzo 2012]. Disponible en Internet: <http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf>

ANEXO A
MATRIZ DE MARCO LÓGICO

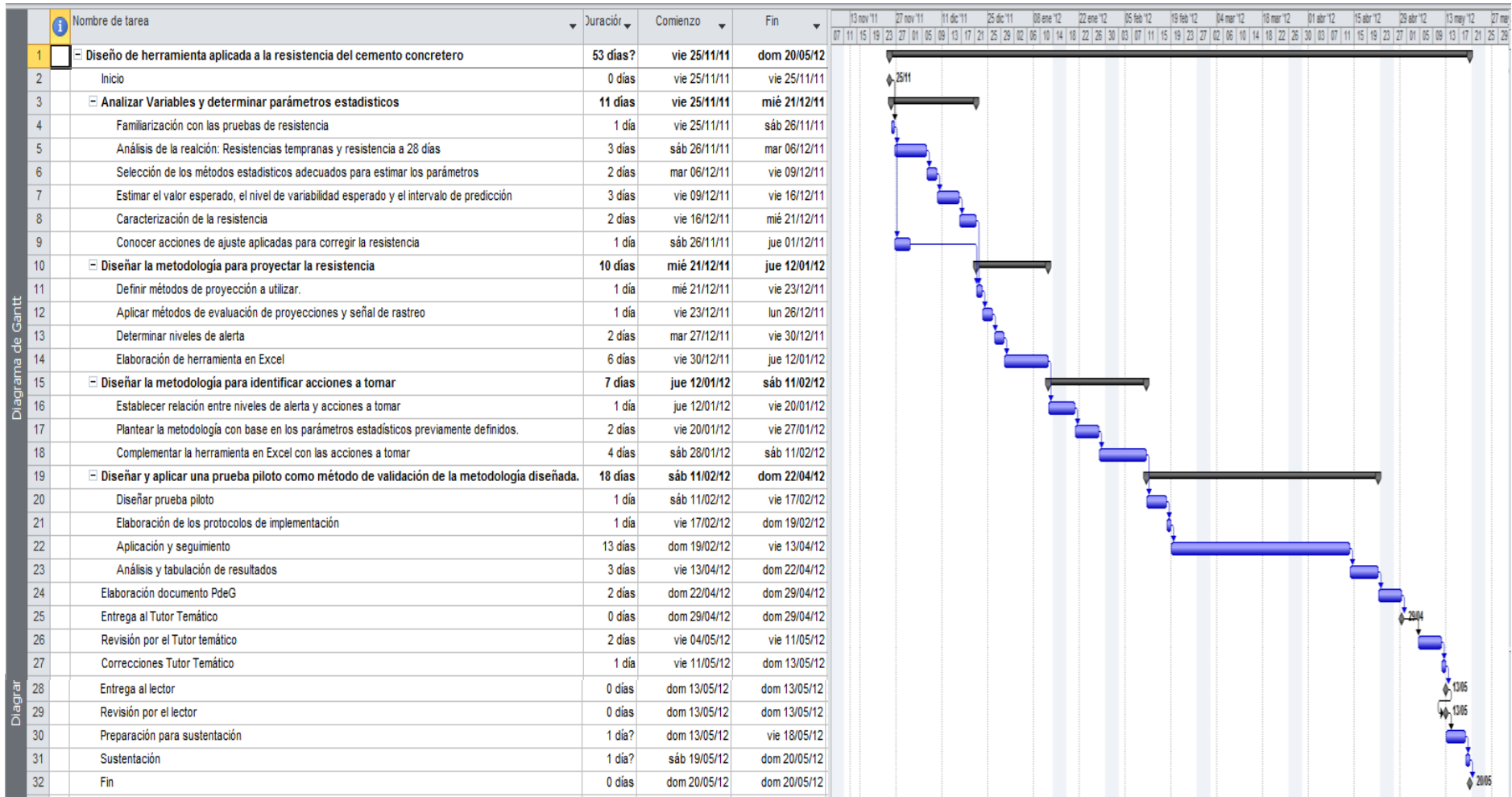
	RESUMEN	PREGUNTAS DE DESEMPEÑO E INDICADORES	MEDIO DE VERIFICACIÓN	SUPUESTOS
OBJETIVO GENERAL	Mejorar la competitividad de la empresa XYZ, mediante el diseño de una herramienta de control para la resistencia a la compresión de 28 días en el cemento concreto.			
OBJETIVO DEL PROYECTO	Diseñar una herramienta metodología que permita estimar los parámetros estadísticos de la variable resistencia a la compresión del cemento concreto a 28 días, producido por	Porcentaje de cumplimiento del proyecto	Seguimiento del cronograma. Reunión con tutores. Entrega de informes.	

	la empresa XYZ, y que logre determinar las acciones de ajuste y sus niveles de aplicación, mediante la evaluación de las variables que afectan dicha resistencia.			
OBJETIVO ESPECÍFICO 1	Caracterizar el proceso y analizar las variables y los parámetros que influyen en la resistencia a la compresión a 28 días del cemento concretero.	¿Se estimó el valor esperado, la variabilidad, y el intervalo de predicción?	Presentación de resultados al tutor	
ACTIVIDAD 1.1	Análisis de la relación: Resistencias tempranas y resistencia a 28 días	¿Se obtuvo suficiente información sobre la relación de las variables?	Determinación del coeficiente de correlación	Correlación entre las variables
ACTIVIDAD 1.2	Selección de los métodos estadísticos adecuados para estimar los parámetros estadísticos	¿Por qué el método seleccionado es el adecuado?	Observaciones del tutor temático	
ACTIVIDAD 1.3	Estimar el valor esperado, el nivel de variabilidad esperado y	¿Se aplicó correctamente la	Observaciones del tutor temático	

	el intervalo de predicción	de teoría?		
ACTIVIDAD 1.4	Caracterización de la resistencia	¿Se comprendió el comportamiento de la variable?	Documento resumen	
ACTIVIDAD 1.5	Conocer acciones de ajuste aplicadas para corregir la resistencia		Documento resumen de alternativas generadas por la empresa	La acciones que emplea la empresa si tiene un impacto positivo en la resistencia del cemento concreto.
OBJETIVO ESPECÍFICO 2	Diseñar la metodología para proyectar la resistencia a 28 días con un nivel de confianza dado.	¿Logra la herramienta en Excel el objetivo de la metodología?	Presentación de resultados al tutor	
ACTIVIDAD 2.1	Definir métodos de proyección a utilizar.	¿Son los métodos los adecuados?	Observaciones del tutor temático	
ACTIVIDAD 2.2	Aplicar métodos de evaluación de proyecciones y señal de rastreo	¿Evidencian estos métodos de evaluación el uso adecuado de las proyecciones?	Matriz de comparación de métodos.	
ACTIVIDAD 2.3	Determinar niveles de	¿Bajo qué teoría se estadística se	Observaciones del tutor	

	alerta	establece el nivel de alerta?		
OBJETIVO ESPECÍFICO 3	Diseñar la metodología para identificar las acciones a tomar, para ajustar los resultados de las pruebas de resistencia.		Revisión del tutor temático.	
ACTIVIDAD 3.1	Establecer relación entre niveles de alerta y las acciones a tomar	¿La acción determinada en cada caso es la correcta frente al nivel de la resistencia?	Observaciones del jefe de calidad de la empresa	Una acción logra ajustar el comportamiento de la resistencia
ACTIVIDAD 3.2	Plantear la metodología con base en los parámetros estadísticos previamente definidos.	¿Se tiene la forma adecuada de ajustar los parámetros ante el ingreso de nuevos datos?		
ACTIVIDAD 3.3	Diseño de herramienta en Excel	¿La herramienta cumple las funciones requeridas?	Observaciones tutor, y gerente de procesos productivos de la empresa	

ANEXO B CRONOGRAMA



ANEXO C

MANUAL DE USUARIO

HERRAMIENTA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A 28 DÍAS (R28)

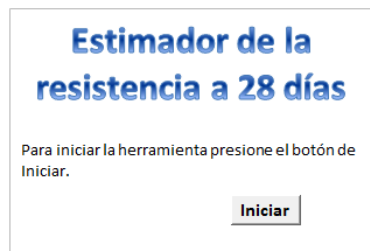
Introducción

Esta es una herramienta que consta de un modelo de estimación de la resistencia a la compresión a 28 días (R28) del cemento concreto, a partir de la resistencia a 1 día (R1), y de un conjunto de alertas y alarmas que de acuerdo basadas en los conceptos de pre-control.

Una vez se ingresan nuevos valores de resistencias R28 y R1, el modelo indica el estimado para R28 y de acuerdo a las alertas y alarmas, indica cómo se espera que se encuentre el valor R28 estimado para el último ingreso de R1.

Instrucciones de uso

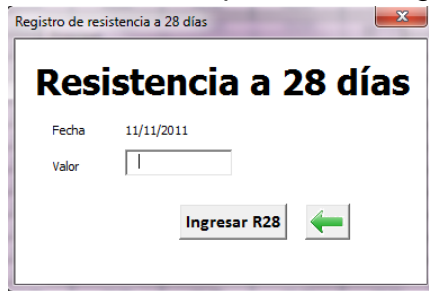
1. Abrir el Archivo de Excel HERRAMIENTA PARA LA ESTIMACIÓN DE R28.
2. Por defecto, el archivo inicia ubicado en la hoja llamada INTERFAZ, de no suceder así debe ubicarse en esa hoja. En la hoja INTERFAZ encontrará el siguiente cuadro de dialogo:



3. Dar click en el botón INICIO para empezar a registrar nuevos valores. Una vez se pulsado el botón aparece la siguiente ventana:



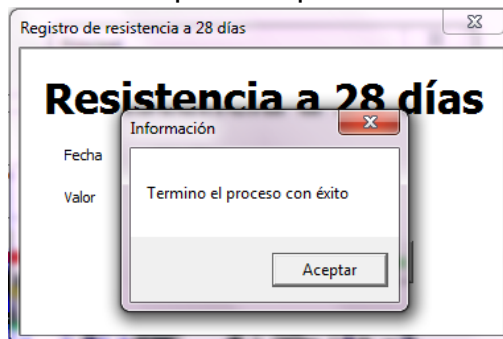
- Para ingresar un nuevo valor de la resistencia a 28 días pulse el botón INGRESAR R28. Al hundir este botón aparecerá la siguiente ventana:



En esta ventana tiene la posibilidad de devolverse a la ventana anterior al hundir la flecha verde. Si desea continuar, proceda a ingresar el valor en la casilla en blanco y luego hunda el botón INGRESAR R28.

La fecha para dicho ingreso ya está registrada en el cuadro de dialogo, pues corresponde a la fecha del ingreso de la resistencia a 1 día (R1) de hace 28 días o mas.

- A continuación aparecerá una ventana de confirmación. Mientras no aparezca la ventana de información quiere decir que la herramienta esta procesando y actualizando la información. Este proceso puede tardar alrededor de 2 minutos.

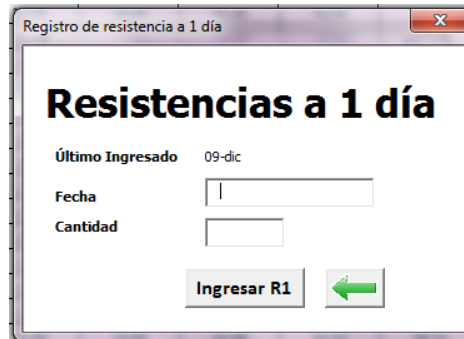


- Presione ACEPTAR

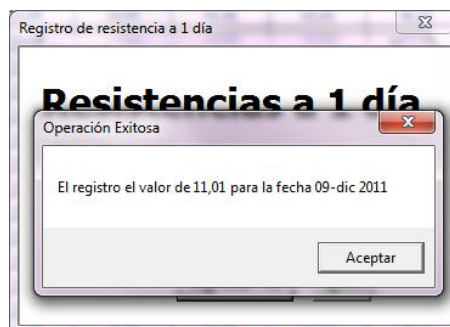
- Para ingresar un nuevo valor de resistencia a 1 día hunda el botón INGRESAR R1 ubicado en la ventana principal



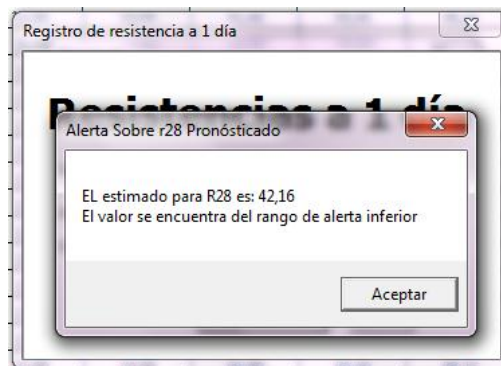
8. A continuación aparece el siguiente cuadro de dialogo, en donde debe registrar la fecha de despacho del cemento para el que va a registrar el valor de la resistencia a 1 día, siguiendo el orden DD/MM/AAAA. Además debe ingresar en el cuadro blanco Valor, la resistencia a 1 día. Proceda a hundir el botón INGRESAR R1.



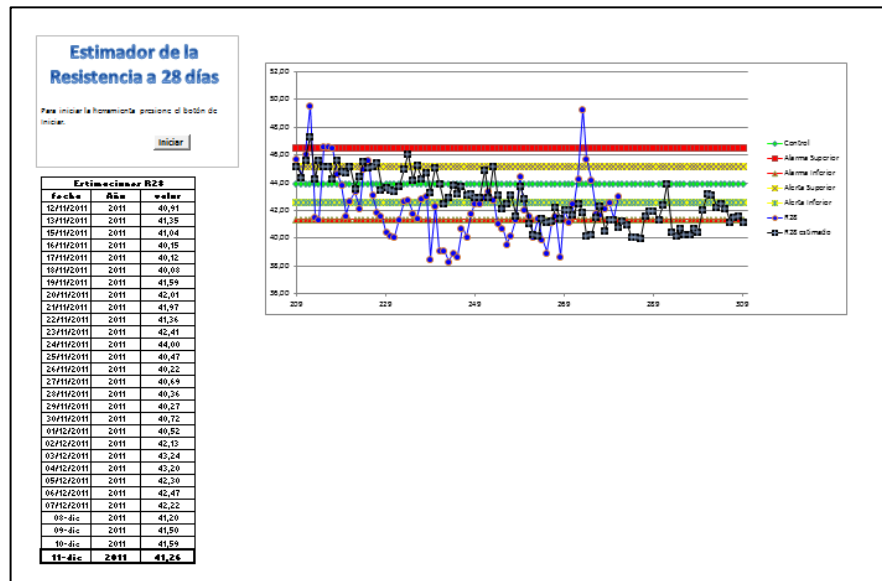
9. Luego, aparecerá un cuadro de dialogo final que indica que el valor a sido ingresado adecuadamente.



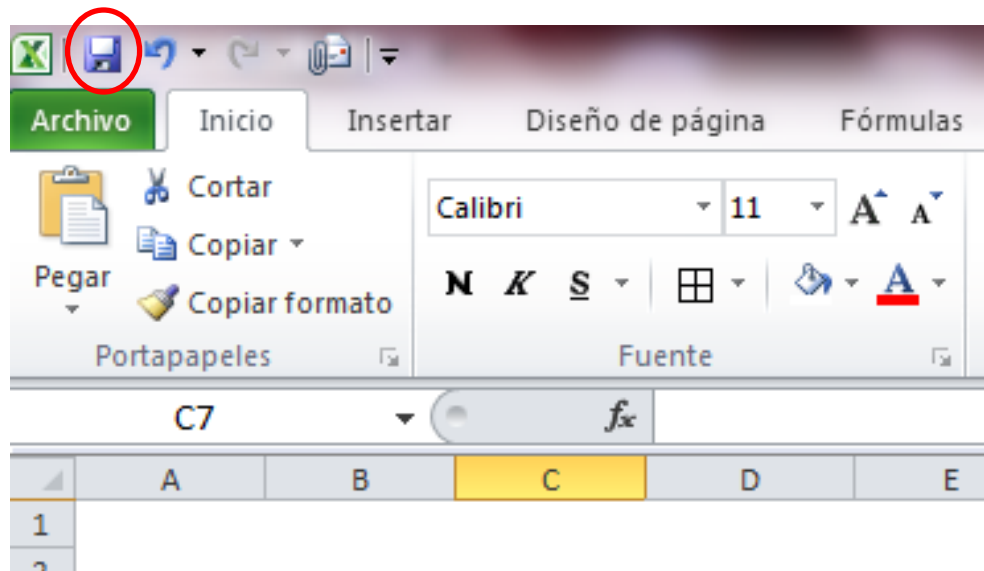
10. A continuación aparece el valor estimado de la resistencia a 28 días de la resistencia a la compresión del cemento para el que se acaba de registrar la resistencia a 1 día, y el estado de dicho valor: en control, en alerta o en alarma.



Adicionalmente, en la hoja INTERFAZ encontrará un gráfico que muestra el valor real de la resistencia a 28 días, para los últimos 72 días, y la estimación que se ha realizado de los 72 valores ya conocidos, y el la de los últimos 28 días para los que asta el momento solo se conoce R1. Además, en esta misa hoja encontrará en una tabla la estimación que se ha realizado para estos últimos 28 días, para los que aún se desconoce el valor real de R28.



11. Finalmente debe dar click en el botón guardar del archivo de Excel, como se muestra en la siguiente imagen.



ANEXO D

MANUAL DE FUNCIONAMIENTO

HERRAMIENTA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A 28 DÍAS (R28)

Introducción

Esta es una herramienta que consta de un modelo de estimación de la resistencia a la compresión a 28 días (R28) del cemento concreto, a partir de la resistencia a 1 día (R1), y de un conjunto de alertas y alarmas que de acuerdo basadas en los conceptos de pre-control.

Una vez se ingresan nuevos valores de resistencias R28 y R1, el modelo indica el estimado para R28 y de acuerdo a las alertas y alarmas, indica cómo se espera que se encuentre el valor R28 estimado para el último ingreso de R1.

Funcionamiento

Como se mencionó en la introducción esta herramienta permite ingresar tanto valores de resistencia a 1 día, como valores de resistencia a 28 días. Para cada tipo de ingreso el proceso a realizar internamente en el modelo es diferente, y se explica a continuación.

REGISTRAR UN R28 REAL

1. Registrar en la hoja Datos el nuevo valor conocido de la resistencia a 28 días. Este proceso se hace mediante la interfaz de usuario.
2. Calcular el nuevo valor de la variable diferencia (R28-R1) (*)
3. Simular con el modelo de suavizamiento exponencial simple (SES) para dicho valor conocido (*)
4. Calcular los nuevos errores conocidos para dicha simulación (*)
5. Optimizar el valor alfa del modelo se SES empleado en el pronóstico de la variable diferencia. Este proceso se hace mediante una macro que emplea Solver, minimizando la desviación absoluta media (DAM) del proceso y cambia el valor del alfa, la macro se nombra: SolverDAM
6. Validar la normalidad de los errores en la hoja: Normalidad Errores Diferencia. Este proceso se hace mediante el uso de la una macro llamada OrdenarErrores.

7. Calcular un nuevo error en el modelo de estimación de la resistencia a 28 días, a partir del valor conocido, y con la estimación de la resistencia a 28 días que se estimó hace alrededor de 28 días. (*)
8. Validar la normalidad de los errores de la estimación de R28 en la hoja: Normalidad Errores Estimación. Al igual que en la otra prueba de normalidad se hace uso de la macro OrdenarErrores.

(*) Esto se hace sin intervención manual ni de macros debido al condicional =SI (“”, “”; formula)

Para este ingreso, la salida mostrada al usuario es únicamente un cuadro de diálogo que informa que el valor ha sido registrado.

REGISTRAR UN R1

1. Registrar en la hoja Datos el nuevo valor conocido de la resistencia a 1 día
2. Estimar la resistencia a la compresión a 28 días del cemento para el que se acaba de registrar la resistencia a 1 día, mediante la adición de R1 con el pronóstico de la diferencia. (*)
3. Desplazar los valores del gráfico de estimación de R28 ubicado en la hoja INTERFAZ para visualizar el resultado, y actualizar la tabla resumen de las últimas 28 estimaciones de R28. Este proceso se hace mediante macros.
4. Indicar de acuerdo al semáforo de pre-control la estimación del estado de dicha resistencia. Esta información sale en un cuadro de diálogo.

