

Universidad de Costa Rica

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

*PRÁCTICA DIRIGIDA DE GRADUACIÓN SOMETIDA A
CONSIDERACIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO
REQUISITO FINAL PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA
EN INGENIERÍA QUÍMICA*

Práctica Dirigida De Graduación

*ANÁLISIS DEL BLOW POINT Y SU EFECTO EN EL FACTOR DE
SEGURIDAD CONTEMPLADO PARA EL TIEMPO DE VULCANIZACIÓN
DE LAS LLANTAS CON EL PROPÓSITO DE LOGRAR MEJORAS EN LA
PRODUCTIVIDAD DE LA EMPRESA.*

Yandi Acuña Vargas

San José, 2022.

**Análisis del Blow Point y su efecto en el factor de seguridad
contemplado para el tiempo de vulcanización de las llantas con el
propósito de lograr mejoras en la productividad de la empresa.**

Informe de la práctica dirigida de graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica como requisito final para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Química.

Sustentante

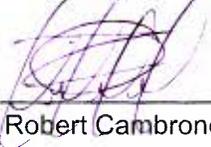
Yandi Acuña Vargas

Tribunal examinador:


Mag. Adolfo Ulate Brenes,
Director, Escuela de Ingeniería Química
Presidente del tribunal


Licda. Natalia Montero Rambla,
Docente, Escuela de Ingeniería Química
Directora del proyecto


Lic. Allan Mora Vindas,
Docente, Escuela de Ingeniería Química
Asesor del proyecto


Lic. Robert Cambronero Castro,
Jefe de Ingeniería de Procesos
Empresa de manufactura de neumáticos automovilísticos
Asesor del proyecto


Lic. Esteban Richmond Salazar
Docente, Escuela de Ingeniería Química
Miembro invitado

DEDICATORIA

Este esfuerzo es dedicado a cada una de las personas que estuvieron conmigo durante este proceso, a Dios que nunca me abandonó permitiéndome llegar hasta este momento y a Yandi de 7 años que un día juró que se convertiría en profesional.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a mi familia, gracias a mis padres por darme el don de la vida y los valores que forjaron la persona que soy hoy en día, gracias por motivarme desde pequeña a luchar por este sueño.

A mi hermana Alejandra por ser mi pilar y mi apoyo incondicional cada día de mi vida, a mi cuñado Octavio por todo el apoyo y cariño durante tantos años, y a cada uno de mis hermanos por ser luz en mi vida.

También quiero agradecer a Luis que ahora es parte de mi familia, gracias por apoyarme en los momentos en los que me sentía exhausta y sin ánimos, por siempre sacarme una sonrisa y darme ese abrazo que tanto necesitaba.

Gracias a mis amigos, a Yuliana por ser mi amiga incondicional y apoyarme durante tantos años. Y a mis amigos de la U, ustedes se convirtieron en mi familia, compartimos alegrías, tristezas, enseñanzas, y muchísimos momentos que por siempre llevaré en mi corazón.

También quiero agradecer a las personas del comité por ayudarme a culminar con esta etapa educativa.

A Robert por ser mi mentor durante la ejecución de esta práctica dirigida, muchísimas gracias por la paciencia y el conocimiento brindado. A Don Gustavo por brindarme la oportunidad y las facilidades para la ejecución de la misma. A los profes Naty y Allan por su conocimiento y apoyo, y cada uno de los profes que me brindaron su conocimiento para la obtención de los resultados.

Finalmente, quiero agradecer a la educación pública por permitirme cumplir mi sueño de ser profesional.

Estaré eternamente agradecida con la UCR por todo el aprendizaje adquirido, esta institución no solo me forjó como profesional, me forjó como persona, me demostró que con mucho esfuerzo y disciplina puedo alcanzar los sueños que me proponga.

RESUMEN

Esta práctica dirigida tuvo como objetivo principal analizar el Blow Point y su efecto en el factor de seguridad contemplado para el tiempo de vulcanización de las llantas con el propósito de lograr mejoras en la productividad de la empresa.

Para ello, inicialmente se realizó un análisis sobre la variabilidad del Blow Point, en donde se determinó que el Blow Point corresponde a la segunda variabilidad con mayor impacto en el cálculo del factor de seguridad, representando un 19% de la influencia total. A partir de este mismo análisis se determinó que los hules: H6, H7, H16, H23 y H33 presentan una mayor desviación estándar en los datos del Blow Point, siendo el hule H23 seleccionado como caso base para la implementación de oportunidades de mejora, debido a que no solo presenta la mayor desviación estándar, sino que presenta el mayor impacto en el cálculo de la capacidad del proceso, es importante mencionar que los datos de los hules seleccionados presentan un comportamiento normal según la prueba de Anderson-Darling.

Posteriormente, se procedió a evaluar el ensayo de medición del Blow Point con el fin de determinar factores influyentes sobre la variación del mismo. Una vez evaluado cada factor se concluyó que los factores influyentes se encuentran asociados a hombre y método, siendo estos: conocimiento de los criterios para la lectura del poro según la instrucción de trabajo (IT), grosor de la muestra, dopping del equipo y eliminación de aire en la muestra; mismos que se sintetizaron en un diagrama de Ishikawa.

Adicionalmente, como parte del método de medición se procedió a determinar la incertidumbre expandida asociada a la medición, siendo de $U=0.038$ adim con un factor de cobertura $k=2$ y un nivel de confianza del 95%. Dicha estimación arrojó como conclusión que la incertidumbre tiene un bajo impacto sobre los valores obtenidos del Blow Point, por lo tanto, no se considera como un factor de impacto en la bús-

queda de oportunidades de mejora asociadas al ensayo.

Como parte del análisis del método de ensayo se realizó un análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R), en el cual se determinó que la variación total asociada al ensayo es de 70.8 % lo cual es *inaceptable*, por lo que se concluye que el método de ensayo requiere mejoras para su ejecución, además se determinó que no cumple los criterios de sesgo y linealidad.

Adicionalmente, a partir de las oportunidades de mejora implementadas: modificación del contenido de la instrucción de trabajo, elaboración de la ayudas visuales de peso por tipo de hule y lectura del poro y creación de la lista de chequeo, se logró un porcentaje de reducción de la variación total asociada al método de ensayo del 63.2 %, convirtiéndolo en aceptable según los criterios de aceptación estipulados para el análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R).

Por último, se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos del análisis de variabilidad para los hules seleccionados previo y posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora ya antes mencionadas, y se detectó una disminución en los datos de variabilidad. Así mismo, se recalcularon los valores del factor de seguridad y se obtuvo una reducción de 1 % para el caso del cálculo en las prensas que utilizan gas nitrógeno y de un 2 % para el caso de las prensas que utilizan agua.

Índice

	<i>Página</i>
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Alcance del proyecto	2
1.2 Objetivo General	3
1.3 Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO 2	
FUNDAMENTO TEÓRICO	5
2.1 Fundamentos teóricos sobre el proceso de vulcanización	5
2.1.1 Agentes vulcanizantes	6
2.1.2 La temperatura y sus efectos en la estructura del caucho	7
2.1.3 Proceso de vulcanización	8
2.1.4 Reacción de vulcanización	9
2.1.5 Prensa de vulcanización	12
2.2 Aspectos relacionados al efecto de curado de los ciclos de vulcanización	13
2.2.1 Efecto de Curado	14
2.2.2 Mejor tiempo de curado	14
2.2.3 Cálculo del curado equivalente	14
2.2.4 Cálculo del factor de seguridad	15
2.3 Pruebas de porosidad	15
2.3.1 Factores que afectan la porosidad	16
2.3.2 Prueba de poro	17
2.3.3 Prueba de termopares	19
2.3.4 Prueba de punto de soplo (Blow Point)	19

2.4	Otras pruebas de interés	21
2.4.1	Prueba de Reometría	21
2.4.2	Prueba de Dispersión	24
2.5	Determinación de la capacidad de un proceso	25
2.5.1	Control estadístico de procesos	26
2.5.2	Variación de un proceso	26
2.6	Análisis estadísticos en el control de procesos.	28
2.6.1	Prueba de Normalidad	28
2.6.2	Análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R)	29
2.7	Herramientas de análisis estadísticos en el control de procesos.	31
2.7.1	Gráficos de control	32
2.7.2	Gráficos de dispersión	33
2.7.3	Diagrama Causa-Efecto	35
2.8	Estandarización de métodos de medición	37
2.8.1	Lista de Chequeo	38
2.8.2	Ayuda Visual	39
2.9	Correlaciones matemáticas	39
2.9.1	Correlación lineal y no lineal	40
2.9.2	Modelo predictivo o de regresión	40
2.9.3	Análisis multivariable	41

CAPÍTULO 3

	ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DEL BLOW POINT	43
3.1	Introducción	43
3.2	Metodología	45
3.3	Análisis histórico sobre la variabilidad de los datos del Blow Point	45
3.4	Estudio de normalidad en los hules que presentan mayor variabilidad	50

CAPÍTULO 4

	EVALUACIÓN DEL ENSAYO DEL BLOW POINT	53
4.1	Introducción	53
4.2	Metodología	55

4.3	Metodología utilizada para la ejecución de la prueba	56
4.3.1	Recolección de los hules	56
4.3.2	Preparación de la muestra	56
4.3.3	Analizador de Blow Point	58
4.3.4	Ejecución de la prueba	60
4.3.5	Análisis de la muestra	61
4.4	Factores de variabilidad asociados al ensayo del Blow Point	62
4.4.1	Material	63
4.4.2	Máquina	65
4.4.3	Método	66
4.4.4	Hombre	67
4.5	Evaluación del ensayo del Blow Point	68
4.6	Fuentes de variación contempladas en el análisis	69
4.7	Determinación de la incertidumbre asociada al ensayo	71
4.8	Análisis de reproducibilidad y repetibilidad (R&R	78
4.9	Análisis de sesgo y linealidad	84

CAPÍTULO 5

	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE ENSAYOS DE MEDICIÓN	89
5.1	Metodología	89
5.2	Análisis de correlación lineal	90
5.2.1	Correlación lineal entre los ensayos del Blow Point y dispersión de negro de humo	90
5.2.2	Correlación entre los ensayos del Blow Point y reometría	94
5.3	Análisis de correlación no lineal	97
5.3.1	Correlación no lineal entre los ensayos del Blow Point y dispersión de negro de humo	97
5.3.2	Correlación no lineal entre los ensayos del Blow Point y reometría	98
5.4	Determinación de variables con mayor influencia en la aparición del poro	98

CAPÍTULO 6

PROPUESTA DE OPORTUNIDADES DE MEJORA QUE INVOLUCRAN EL FACTOR DE SEGURIDAD INVOLUCRADO EN EL CICLO DE VULCANIZACIÓN	101
6.1 Introducción	101
6.2 Metodología	101
6.3 Modificación del contenido de la instrucción de trabajo	102
6.4 Elaboración de ayuda visual de pesos por tipo de hule	103
6.5 Elaboración de ayuda visual para la lectura del poro	103
6.6 Análisis de repetibilidad y reproducibilidad posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora	105
6.7 Análisis de sesgo y linealidad	107
6.8 Análisis comparativo de los datos del Blow Point para el hule de mayor variabilidad posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora.	110
6.9 Comparación del factor de seguridad previo y posterior a la aplicación de oportunidades de mejora.	114
6.10 Documento entregable sobre las propuesta de oportunidades de mejora planteadas	118
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
NOMENCLATURA	123
BIBLIOGRAFÍA	125
APÉNDICES	129
A DATOS INTERMEDIOS	129
B MUESTRA DE CÁLCULOS	166
ANEXOS	171

Índice de cuadros

Cuadro 3.1	Datos de los hules con mayor desviación estándar para los años 2019 y 2020	46
Cuadro 3.2	Valor de p obtenido por tipo de hule a partir del análisis de normalidad realizado en el software Minitab.	51
Cuadro 4.1	Resumen del valor calculado para cada fuente de variación contemplada como parte del cálculo de la variación total del ensayo.	78
Cuadro 4.2	Datos del porcentaje de variación obtenidos del análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) haciendo uso del software Minitab.	80
Cuadro 4.3	Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición	85
Cuadro 4.4	Datos obtenidos para el sesgo del sistema de medición.	86
Cuadro 5.1	Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y Porcentaje de Dispersión para los hules de estudio seleccionados, haciendo uso de Minitab.	93
Cuadro 5.2	Valores de R-cuadrado obtenidos para el hule H23 como parte del análisis de correlación entre blow point y reometría, para la temperaturas de 433.15 K y 473.15 K	96
Cuadro 5.3	Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y reometría para el hule de estudio (H23), haciendo uso de Minitab.	97
Cuadro 5.4	Datos obtenidos para el análisis de correlación no lineal entre el Blow Point y la dispersión de negro de humo por medio del software JMP	97
Cuadro 5.5	Matriz de de correlación no lineal obtenida a partir del software JMP para el caso del hule H23.	98
Cuadro 6.1	Comparación del porcentaje de variación obtenido del análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) previo y posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora, haciendo uso del software Minitab.	106

Cuadro 6.2	Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición final.	107
Cuadro 6.3	Datos obtenidos para el sesgo del sistema de medición final.	109
Cuadro 6.4	Cuadro comparativo de los resultados obtenidos para la variación del blow point, porcentaje de influencia del blow point,y factor de seguridad para los períodos 2019-2020 y 2020-2021 utilizando gas nitrógeno.	115
Cuadro 6.5	Cuadro comparativo de los resultados obtenidos para la variación del blow point, porcentaje de influencia del blow point,y factor de seguridad para los períodos 2019-2020 y 2020-2021 utilizando agua.	117
Cuadro A.1	Valores de desviación estándar y cálculo de la capacidad del proceso de los hules seleccionados por su impacto en el factor de seguridad.	129
Cuadro A.2	Datos utilizados para el cálculo de la desviación histórica como parte del análisis de incertidumbre.	132
Cuadro A.3	Valores utilizados como parte de la determinación de incertidumbre mediante el uso del método numérico.	132
Cuadro A.4	Valores utilizados como parte de la determinación de incertidumbre mediante el uso del método numérico.	133
Cuadro A.5	Datos recolectados del operador 1 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad inicial del sistema de medición del blow point.	134
Cuadro A.6	Datos recolectados del operador 2 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad inicial del sistema de medición del blow point.	134
Cuadro A.7	Datos recolectados del operador 3 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad inicial del sistema de medición del blow point.	135
Cuadro A.8	Cuadro ANOVA para el análisis de dos factores con interacción,con α para eliminar el término de interacción igual a 0,05.	135

Cuadro A.9	Componentes de la varianza y su respectivo porcentaje de contribución al sistema de medición inicial del análisis R&R . . .	135
Cuadro A.10	Evaluación del sistema de medición inicial.	136
Cuadro A.11	Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición inicial	136
Cuadro A.12	Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición inicial.	136
Cuadro A.13	Datos obtenidos para el sesgo del sistema de medición inicial	136
Cuadro A.14	Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y la dispersión de negro de humo para el hule H6.	137
Cuadro A.15	Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y la dispersión de negro de humo para el hule H7.	138
Cuadro A.16	Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y la dispersión de negro de humo para el hule H16.	139
Cuadro A.17	Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y la dispersión de negro de humo para el hule H23.	140
Cuadro A.18	Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y la dispersión de negro de humo para el hule H33.	141
Cuadro A.19	Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y reometría a 433.15 K(160 °C) y 473.15 K(200 °C) para el hule H6.	142
Cuadro A.20	Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y reometría a 433.15 K(160 °C) y 473.15 K(200 °C) para el hule H7.	143

Cuadro A.21	Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y reometría a 433.15 K(160 °C) y 473.15 K(200 °C) para el hule H16.	144
Cuadro A.22	Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y reometría a 433.15 K(200 °C) y 473.15 K(200 °C) para el hule H23.	145
Cuadro A.23	Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y reometría a 433.15 K(160 °C) y 473.15 K(200 °C) para el hule H33.	146
Cuadro A.24	Valores de R-cuadrado obtenidos para los hules seleccionados de estudio como parte del análisis de correlación entre Blow Point y reometría, para las temperaturas de 433.15 K y 473.15 K . . .	151
Cuadro A.25	Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y reometría para el hule H6, haciendo uso de Minitab.	151
Cuadro A.26	Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y reometría para el hule H7, haciendo uso de Minitab.	151
Cuadro A.27	Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y reometría para el hule H17, haciendo uso de Minitab.	152
Cuadro A.28	Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y reometría para el hule H33, haciendo uso de Minitab.	152
Cuadro A.29	Matriz de de correlación no lineal obtenida a partir del software JMP para el caso del hule H6.	152
Cuadro A.30	Matriz de de correlación no lineal obtenida a partir del software JMP para el caso del hule H7.	153
Cuadro A.31	Matriz de de correlación no lineal obtenida a partir del software JMP para el caso del hule H17.	153

Cuadro A.32	Matriz de de correlación no lineal obtenida a partir del software JMP para el caso del hule H33.	154
Cuadro A.33	Datos recolectados del operador 1 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad final del sistema de medición del blow point.	154
Cuadro A.34	Datos recolectados del operador 2 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad final del sistema de medición del blow point.	155
Cuadro A.35	Datos recolectados del operador 3 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad final del sistema de medición del blow point.	155
Cuadro A.36	Cuadro ANOVA para el análisis R&R final de dos factores con interacción, con α para eliminar el término de interacción igual a 0,05.	156
Cuadro A.37	Componentes de la varianza y su respectivo porcentaje de contribución al sistema de medición final del análisis R&R . . .	156
Cuadro A.38	Evaluación del sistema de medición final.	156
Cuadro A.39	Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición final.	157
Cuadro A.40	Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición final.	157

Índice de figuras

Figura 2.1	Comportamiento de las propiedades del material vulcanizado en función de la densidad de entrecruzamientos presentes (<i>Yepes et al., 2017</i>).	6
Figura 2.2	Cambio estructural ocurrente en las moléculas de un caucho con y sin el proceso de vulcanización (<i>Yepes et al., 2017</i>).	9
Figura 2.3	Puntos críticos de un neumático (<i>Faulk, 2017</i>).	18
Figura 2.4	Cambio estructural en las moléculas del caucho con y sin el proceso de vulcanización, descrito en un análisis reométrico para observar el comportamiento del torque a lo largo del tiempo en el material (<i>Ramirez, 2006</i>).	23
Figura 2.5	Representación gráfica del concepto de repetibilidad (<i>Portuondo y Portuondo, 2010</i>).	30
Figura 2.6	Representación gráfica del concepto de reproducibilidad (<i>Portuondo y Portuondo, 2010</i>).	30
Figura 2.7	Ejemplo de un gráfico de control (<i>Izar y González, 2004</i>).	33
Figura 2.8	Ejemplo de un gráfico de dispersión (<i>Estepa, 2008</i>).	34
Figura 2.9	Ejemplo de un diagrama de Ishikawa (<i>González, 2014</i>).	36
Figura 2.10	Pasos para la estimación de la incertidumbre (<i>Elaboración propia</i>)	37
Figura 3.1	Gráfico porcentual de la influencia de cada variable sobre el cálculo del factor de seguridad para datos registrados en el período 2019-2020 en una prensa que utiliza agua como medio de transferencia de calor.	44
Figura 3.2	Perfil de un neumático(Adaptado de Faulk,2017).	47
Figura 3.3	Valor de desviación estándar(σ) y de capacidad del proceso ($\sigma \times BCT$) para los hules seleccionados.	48
Figura 3.4	Gráfico de Normalidad de Blow Point para el hule H23.	52
Figura 4.1	Gráfico de control para el hule H23 en el período 2019-2020.	54

Figura 4.2	Molino utilizado para la preparación de la banda lisa de hule.	57
Figura 4.3	Lámina de hule posterior al proceso de molineado.	57
Figura 4.4	Molde utilizado con la dimensiones de la muestra.	58
Figura 4.5	Eliminación de burbujas en la muestra recortada, según dimensiones establecidas.	58
Figura 4.6	Equipo de medición del Blow Point.	59
Figura 4.7	Molde del blow point y localización de los termopares. . .	60
Figura 4.8	Guillotina y cuchilla con líneas guías, utilizada para el corte de la muestra.	61
Figura 4.9	Muestra de hule con porosidad.	62
Figura 4.10	Diagrama de Ishikawa con la lista preliminar de factores de variación asociados al método de medición del blow point. . . .	63
Figura 4.11	Lista de verificación elaborada como parte del proceso de estandarización de método de medición del Blow Point. (<i>Elaboración propia</i>).	70
Figura 4.12	Diagrama de Ishikawa elaborado a partir del análisis del método de medición.	70
Figura 4.13	Diagrama de Ishikawa sobre la determinación de la incertidumbre asociada al método de medición.	72
Figura 4.14	Evaluación del rendimiento del proceso.	80
Figura 4.15	Evaluación del sistema de medición.	81
Figura 4.16	Gráfica R por operadores.	81
Figura 4.17	Gráfica Xbarra por operadores.	82
Figura 4.18	Gráfica de medición por partes.	83
Figura 4.19	Gráfica de medición por operadores.	83
Figura 4.20	Gráfica de medición por operadores.	84
Figura 4.21	Gráfica de sesgo y linealidad del sistema de medición inicial.	85
Figura 5.1	Gráfica de correlación lineal entre el Blow Point y el porcentaje de dispersión para el caso del hule H23.	92

Figura 5.2	Gráficas de correlación lineal entre el Blow Point y el Porcentaje de dispersión para los hules de estudio seleccionados: a)H33, b)H6, c)H7 y d)H16	94
Figura 5.3	Gráficas de correlación lineal entre el Blow point y el ensayo de reometría para el hule en estudio H23: a)TC50 a 433.15K, b)TC90 a 433.15 K, c)TC50 a 473.15 K y d)TC90 a 473.15 K . . .	96
Figura 6.1	Caso 1 de la ayuda visual utilizada para la lectura del poro en la muestra. (<i>Elaboración propia</i>).	105
Figura 6.2	Evaluación final del sistema de medición.	106
Figura 6.3	Gráfica de sesgo y linealidad del sistema de medición final.	108
Figura 6.4	Gráfico de control sobre la variación del Blow Point a través del tiempo para el hule H23.	110
Figura 6.5	Gráfico de control sobre la variación del Blow Point a través del tiempo para el hule H6.	112
Figura 6.6	Gráfico de control sobre la variación del Blow Point a través del tiempo para el hule H7.	112
Figura 6.7	Gráfico de control sobre la variación del Blow Point a través del tiempo para el hule H16.	113
Figura 6.8	Gráfico de control sobre la variación del Blow Point a través del tiempo para el hule H33.	113
Figura 6.9	Gráfico del porcentaje de influencia del blow point para ambos tipos de llanta, en los períodos 2019-2020 y 2020-2021. . . .	116
Figura 6.10	Gráfico del porcentaje de influencia del blow point para ambos tipos de llanta, en los períodos 2019-2020 y 2020-2021. . . .	117
Figura A1	Gráfico de Normalidad de Blow Point para el hule H6.	130
Figura A2	Gráfico de Normalidad de Blow Point para el hule H7.	130
Figura A3	Gráfico de Normalidad de Blow Point para el hule H16.	131
Figura A4	Gráfico de Normalidad de Blow Point para el hule H33.	131
Figura A5	Gráfico de ajuste de regresión lineal para la determinación de la incertidumbre.	133
Figura A6	Gráfica de medición por operadores.	137

Figura A7	Gráficas de correlación lineal entre el Blow point y el ensayo de reometría para el hule en estudio H6.	147
Figura A8	Gráficas de correlación lineal entre el Blow point y el ensayo de reometría para el hule en estudio H7.	148
Figura A9	Gráficas de correlación lineal entre el Blow point y el ensayo de reometría para el hule en estudio H17.	149
Figura A10	Gráficas de correlación lineal entre el Blow point y el ensayo de reometría para el hule en estudio H33.	150
Figura A11	Gráfico R por operador para el análisis R&R final.	157
Figura A12	Gráfico Xbarra por operador para el análisis R&R final.	158
Figura A13	Gráfico de Medición por parte para el análisis R&R final.	158
Figura A14	Gráfico de Medición por Operador para el análisis R&R final.	159
Figura A15	Gráfico de Interacción Partes por Operador para el análisis R&R final.	159
Figura A16	Extracto de la lista de verificación elaborada como parte de la ejecución de la práctica.	160
Figura A17	Caso 1: Poro con secuencia.	161
Figura A18	Caso 2: Poro grande con tendencia.	161
Figura A19	Caso 3: Aleatoriedad de poro.	162
Figura A20	Caso 4: Poro aislado con secuencia.	162
Figura A21	Caso 5: Afloramiento.	163
Figura A22	Caso 6: Aglomeración de poros.	163
Figura A23	Caso 7: Poro aislado sin tendencia posterior.	164
Figura A24	Caso 8: Separación de caras.	164
Figura A25	Caso 9: Porosidad cerca de la superficie.	165
Figura A26	Caso 10: Sobrecurado.	165
Figura B1	Certificado de Calibración para el la regla metálica 763-175 utilizada como parte del ensayo del Blow Point.	171

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El ser humano se ha encargado de aprovechar los recursos naturales, creando procesos químicos que involucren la transformación de esta materia a productos que permitan satisfacer alguna necesidad presente en la sociedad, el caucho corresponde a uno de estos recursos. El caucho natural surgió como material de uso en la sociedad dando respuesta a las necesidades de transporte, siendo este una mercancía bastante importante por su relevancia económica y militar. La alta demanda llevó a la idea de obtener caucho sintético, de tal manera que se pudiera suplir esta necesidad, hoy en día el hule sintético corresponde a un 70 % (Akron, 1998) del utilizado a nivel industrial para la manufactura de los productos que lo requieren, como es el caso de la fabricación de llantas .

El neumático o llanta, como comúnmente se conoce yace alrededor de los 1800's gracias a la invención del norteamericano Charles Goodyear, quién descubrió el proceso de vulcanización, el cual da al caucho la resistencia y solidez necesaria para su transformación en material de utilidad en la producción de los neumáticos (Friedenthal, 2007).

El principal componente de este producto es el caucho, siendo este casi la mitad de su peso, sin embargo, se encuentra compuesto por otra serie de materiales que le brindan la uniformidad necesaria para su fabricación. La composición en materiales, así como su estructura dependerán de la finalidad de uso que se le quiera dar al producto.

La industria llantera cada vez ha tenido mayor expansión, lo cual implica una alta exigencia por parte del mercado, no solo en términos de productividad, sino también en cuanto al control de calidad respecta. Es por esto que debido al gran dinamismo de la economía se busca crear mejoras en los procesos de producción, garantizando la calidad del producto, y el abastecimiento del mismo, de tal manera que se cumpla

con la demanda del mercado.

1.1. Alcance del proyecto

Uno de los procesos fundamentales en este tipo de industria corresponde a la vulcanización, este proceso es crítico para la obtención del producto final.

En el proceso de vulcanización existen varios factores operativos influyentes, uno de estos es el tiempo de curado del hule. El cual corresponde al valor mínimo al que el material debe estar sometido a una temperatura para darle las propiedades mecánicas deseadas, así como la forma final del producto.

De la elección de este tiempo se pueden derivar dos situaciones antagónicas afectando la calidad de manufactura. La primera es que no se complete el proceso de vulcanización, dando origen a lo que en la jerga industrial se conoce como *llanta cruda*, es decir, la reacción química para la formación del elastómero no se lleva a cabo por completo. Y la segunda es sobrepasar el tiempo de transferencia de calor por conducción una vez que la reacción ya se completó. El excedente de este factor ocasiona una sobre vulcanización del material, dando igualmente condiciones finales indeseadas.

Como medida de seguridad, en el proceso productivo se contempla un factor de seguridad. El cuál corresponde a un tiempo que se calcula de acuerdo a requerimientos corporativos, para dicho cálculo se implementa una sumatoria de 7 fuentes de variabilidad asociadas al proceso.

Este tiempo cálculo para efecto del factor de seguridad es sumado al tiempo de curado inicial que ya se encuentra definido a nivel operativo por la empresa.

Actualmente, la empresa en estudio presenta la necesidad de mejorar el factor de seguridad de las llantas. Dicho factor contempla la suma de siete variabilidades que son tomadas en cuenta durante el proceso de producción, siendo el Blow Point (*punto de burbuja* en español) una de las que presenta mayor porcentaje de contribución en su cálculo.

El Blow Point corresponde un valor arrojado por una medición directa basada en la relación existente con el tiempo de curado (vulcanización), el cuál se puede ver afectado por variaciones en las etapas del proceso de producción, o por el mismo método utilizado para su obtención. Y por ende, se desean determinar factores asociados a su variación.

Por tanto el interés de la empresa con la presente Práctica Dirigida se basa en determinar factores asociados a la variación del Blow Point. Evaluando el impacto que genera el método de medición en la obtención de los resultados. Y adicionalmente, se plantea el estudio de correlaciones entre métodos de medición, que permitan obtener información de interés sobre factores que podrían estar asociadas a dichas variaciones.

Al lograr una disminución en la variable del Blow Point, se tendría el impacto deseado sobre el factor de seguridad contemplado en los ciclos de vulcanización.

Esta disminución permitiría a la empresa la toma de decisiones para elevar la producción y disminuir los costos de producción.

1.2. Objetivo General

Analizar el blow point y su efecto en el factor de seguridad contemplado para el tiempo de vulcanización de las llantas con el propósito de lograr mejoras en la productividad de la empresa.

1.3. Objetivos Específicos

- Evaluar el método de medición del blow point utilizado en la empresa a fin de lograr la estandarización del mismo, así como la determinación de la incertidumbre asociada a esta medición.
- Analizar los métodos de medición de reometría y de porcentaje de disper-

sión propuestos por la empresa, en busca de oportunidades de mejora en la variabilidad del blow point.

- Proponer oportunidades de mejora que involucren el factor de seguridad contemplado en el proceso de producción de llantas.
- Evaluar la implementación de las oportunidades de mejora propuestas.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

En el presente capítulo se abordan conceptos y temas claves que brindan información de interés para la comprensión del documento.

2.1. Fundamentos teóricos sobre el proceso de vulcanización

A menudo se relaciona el término de caucho con elastómero. Un elastómero es un polímero amorfo que estructuralmente se ve modificado al estar sometido a cambios de temperatura. Sus temperaturas de uso normal se encuentran por encima de la temperatura de transición vítrea, por lo que el movimiento molecular en su estructura es considerable, ocasionando que el compuesto adquiera ciertos cambios en sus características estructurales. De acuerdo a la ASTM (D1566) un caucho es un material capaz de recuperarse rápidamente al ser sometido a grandes deformaciones, sin embargo, a temperatura ambiente presentan suavidad y deformabilidad, es por esto que en ocasiones se modifican con el fin de obtener termoestabilidad, lo cual es aprovechado en muchas aplicaciones de tipo industrial (Engineering, 2015).

El nivel de elasticidad alcanzada en un elastómero se encuentra relacionado con el número de entrecruzamientos formados durante la reacción de vulcanización, la dependencia de este factor repercute en las propiedades fisicoquímicas del material dado que ocasiona variaciones en la densidad del mismo. A medida que aumenta la densidad de este, también lo hace la rigidez y la recuperación elástica del elastómero; así propiedades como el esfuerzo a la tensión, la resistencia a la fatiga, dureza y el comportamiento ante cizalladuras presentan un comportamiento parabólico, donde existe un punto máximo a una densidad del material específica, una vez superado este límite las propiedades del mismo comienzan a decaer, ocasionando por lo general una deformación permanente del polímero (Yepes *et al.*, 2017).

En la Figura 2.1 se puede observar el cambio en el comportamiento de las propiedades de un material vulcanizado en función de la densidad de entrecruzamientos presentes en el mismo.

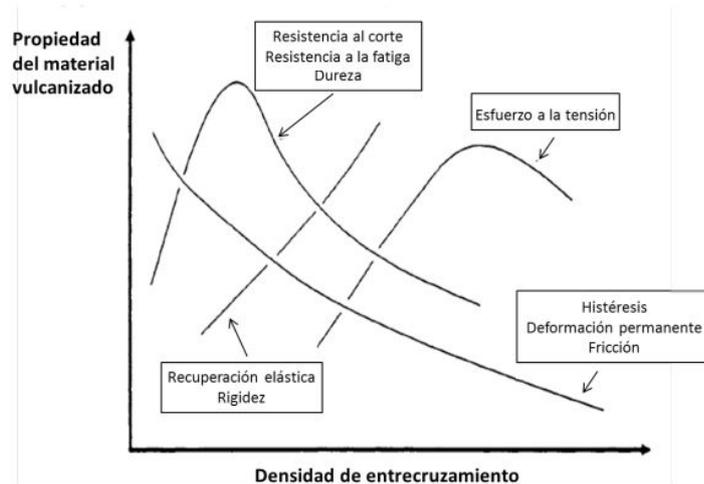


Figura 2.1. Comportamiento de las propiedades del material vulcanizado en función de la densidad de entrecruzamientos presentes (Yepes *et al.*, 2017).

2.1.1. Agentes vulcanizantes

Para llevar a cabo la reacción de vulcanización se pueden utilizar una serie de componentes en el hule que contribuyen en la cinética de reacción, ya sea acelerando o retardando la velocidad de reacción según los requerimientos del proceso, reduciendo la temperatura de vulcanización, y para mejorar las propiedades físicas o mecánicas del caucho vulcanizado. A continuación, se detalla más sobre estos (Ramos y Sánchez, 1999).

- **Acelerantes:** Un acelerante corresponde a un componente con una serie de propiedades que permiten cambiar las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la reacción. Con este no solo se logra disminuir la temperatura de vulcanización, sino que también se reduce el tiempo de vulcanizado.

Cuando se utiliza un acelerante se logra reducir la cantidad de agente vulcanizante agregada a la mezcla. Es importante tomar en cuenta que al seleccionar un material de este tipo se deben de contemplar situaciones adicionales a la

velocidad en la que se efectuará la reacción, la prevulcanización del hule es un factor a tomar en cuenta, así como el tiempo de residencia producto de la temperatura. Algunos de los acelerantes comúnmente utilizados son: guanidinas, sulfamidas, tiazoles, tiourames y carbamatos. Es importante mencionar que el tipo de acelerante seleccionado se basa según el efecto dado a la velocidad de vulcanización, subdividiendo estos en las siguientes categorías: acelerante lento, rápido y súper rápido o ultra acelerador.

- Retardantes: Por otra parte, un retardante cumple la función de evitar que el elastómero se vea modificado antes de iniciar el proceso de vulcanización. Al agregar el retardante se contrarresta en gran parte el efecto del acelerante sin que se vea modificada la cinética de la reacción, de manera tal que el material no vulcanice anticipadamente. Un ejemplo de agente retardante utilizado corresponde al óxido de magnesio.
- Activantes: Cuando se utiliza el acelerante este se debe combinar con un activante a fin de promover que se de lugar a la reacción. Estos no participan de manera directa en la cinética de la misma, su función radica en la influencia que tiene sobre las estructuras del polímero formado, y con esto en el trayecto del vulcanizado. Algunos ejemplos de agente activantes son: óxido de zinc o magnesio y derivados del óxido de etileno.
- Vulcanizantes: Estos corresponden a aquellos componentes que se encargan de generar el entrecruzamiento de las cadenas del polímero, creando nuevas estructuras con redes tridimensionales que brindan mayor estructura al material. Compuestos sulfurados o en algunos casos peróxidos son los elegidos para lograr dichos entrecruzamientos con las cadenas de carbono, para el caso de la industria del caucho el de mayor utilización corresponde al azufre.

2.1.2. La temperatura y sus efectos en la estructura del caucho

El caucho presenta una gran sensibilidad a los cambios de temperatura. Cuando el caucho está en presencia de calor este adquiere una textura pegajosa, y en el caso

contrario en presencia de frío se vuelve frágil y duro. Este fenómeno de transferencia de calor genera ciertas propiedades físicas como: flexibilidad, extensibilidad, resistencia y durabilidad, las cuales son propias de un elastómero.

Actualmente estas propiedades son de gran aprovechamiento para la producción industrial de muchos productos, y uno de los principales corresponde a la fabricación de neumáticos (Kasner y Meincke, sf). Para lograr esta conversión se lleva cabo un proceso de vulcanización en el cual se contemplan varios parámetros de operación, según las condiciones deseadas del producto final, en el siguiente apartado se hace énfasis a esta situación.

2.1.3. Proceso de vulcanización

El caucho consiste en un polímero lineal ramificado que forma estructuras terciarias y cuaternarias, producto del entrecruzamiento consigo mismo y sus moléculas pares. Cabe resaltar que sus cadenas no se encuentran de manera directa unidas entre sí, la mayor parte de esta unión se debe a fuerzas intermoleculares débiles.

En el caso de un proceso de vulcanizado se lleva a cabo la conversión del caucho de un estado plástico a uno elástico, esto mediante la adición de calor y de un agente vulcanizante como el azufre (Yepes *et al.*, 2017) .

Al estirar el caucho no vulcanizado, este primero sufre una deformación elástica, las moléculas estiradas vuelven a su estado original de manera natural una vez que la coacción externa desaparece. Es por esto que el caucho no reticulado plásticamente es moldeable, así mismo al aumentar el grado de vulcanización, su grado de plasticidad disminuye.

Mediante la vulcanización se producen combinaciones químicas entre las diferentes cadenas de polímeros, generando una red tridimensional en el material. Esto provoca que las cadenas poliméricas ya no pueden deslizarse libremente unas de las otras, en consecuencia, a mayor grado de avance en el proceso de vulcanización este irá perdiendo cada vez más su grado de plasticidad. Dicho en otras palabras, se lleva a

cabo a la conversión del material en un elastómero (Ramos y Sánchez, 1999).

En un proceso de vulcanizado no solo se adiciona el azufre, sino que se somete el material a un incremento de temperatura, esto ocasiona que el azufre reaccione con los dobles enlaces del carbono presentes en las cadenas de los polímeros, formando puentes entre ellas. La cantidad y distribución del azufre en el caucho influyen directamente en el grado de vulcanización que el material alcance. Con una baja dosificación de azufre se obtiene un elastómero blando, y con un alta, uno duro. En la Figura 2.2 se muestra una representación estructural del polímero.



Figura 2.2. Cambio estructural ocuriente en las moléculas de un caucho con y sin el proceso de vulcanización (Yepes *et al.*, 2017).

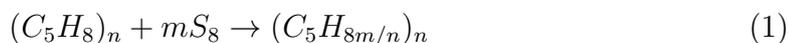
2.1.4. Reacción de vulcanización

En una reacción de vulcanización el caucho y el azufre son los reactivos principales, sin embargo, existen otros materiales que son incorporados a la mezcla para la fabricación del neumático: retardantes, acelerantes, reforzantes, pigmentos, etc.

La proporción de estos en la misma va a depender del compuesto (tipo de hule) del

neumático que se esté fabricando, lo mismo ocurre con la relación de caucho y azufre añadido, ya que esta puede ser variable dependiendo del fin para el que se desee.

Volviendo a lo que ocurre en una reacción de vulcanización, en esta se da un entrelazamiento químico en las moléculas, en donde pueden existir entre 2 y 10 moléculas de azufre en cada puente formado (Yepes *et al.*, 2017) . A continuación, a manera representativa se muestra la reacción química que da lugar al polímero de interés, según sea el caso.



Como se puede denotar existe un valor m como coeficiente de la ecuación y de este dependerá la dureza que se le quiera dar al compuesto en el proceso de curado del hule. Ahora bien, si se cuenta con una mayor cantidad de azufre esto incrementará el número de puentes de formados en el compuesto, y por ende, se obtendrá un material más rígido.

Por otra parte, en la vulcanización no solo se da una adición de azufre, también este caucho que es sulfurado se somete a un proceso de transferencia de calor, con el fin de llevar a cabo el curado del hule.

Por ello varios autores han estudiado la relación existente del grado de vulcanización del material con la cinética de reacción ocurrida en el proceso, reflejando la dependencia con el factor de temperatura. Dicha relación se puede evidenciar mediante la ecuación de Arrhenius, la cual se encuentra en función del tiempo.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = k(1 - \alpha)^n = k_o \exp \frac{-E_a}{RT} (1 - \alpha)^n \quad (2)$$

Dónde:

k	Constante de reacción, adim.
n	Orden de reacción, adim.
k_0	Factor de frecuencia, adim.
R	Constante universal de los gases, J/K* mol .
E_a	Energía de activación, J/mol.
T	Temperatura absoluta, K.
t	Tiempo, s.

La presente ecuación permite controlar la cinética de la reacción como ya se comentó anteriormente, a fin de monitorear el avance de la misma a lo largo del tiempo establecido, de manera que se obtengan resultados deseables en el producto fabricado. Seguidamente, se comentan las etapas por las que atraviesa el caucho en su proceso de curado.

Este proceso se divide básicamente en tres etapas que son: inducción, curado y postcurado. En el caso de la inducción los agentes de curado y aceleradores son los que reaccionan, sin embargo, no se producen entrecruzamientos en la matriz del polímero. Es en esta etapa en donde se determina a nivel práctico el tiempo previo a la vulcanización, lo cual permite controlar una vulcanización prematura en el material.

Por otra parte, en la etapa de curado se da el inicio de la formación de entrecruzamientos, la velocidad a la que estos se formen dependerá de la temperatura aplicada, así como de la composición del caucho. Se dice que la etapa de curado ha alcanzado su valor óptimo cuando se está al 90% del avance de la reacción, lo cual se ve reflejado con aumento en la viscosidad del material (Yepes *et al.*, 2017).

Por último, si la reacción de vulcanización continúa se llega a la etapa de postcurado, provocando un endurecimiento o ablandamiento del hule, incidiendo en la formación de efectos no deseados de la calidad del producto.

2.1.5. Prensa de vulcanización

La vulcanización de neumáticos en verde (sin vulcanizar) es llevada a cabo en un equipo conocido como prensa de vulcanización. Las prensas están compuestas por dos cavidades independientes una de la otra. En las cavidades se instalan los moldes que darán la forma adecuada al neumático. Estas cavidades cuentan con dos platos, uno superior y uno inferior, que son los encargados de transferir el calor al molde, este calor puede ser propiciado de dos maneras diferentes, según sea el mecanismo de la prensa utilizada, mediante un flujo de vapor o por medio de agua de calentamiento, en ambos casos la fuente de calor circula por el interior de estos platos y la inyección del medio de calentamiento es continua.

Estas prensas cuentan con un mecanismo central, cuyo objetivo principal es contener los conductos transportadores del vapor, agua de servicio y gases involucrados, además de encargarse de desplazar la cámara de caucho de butilo.

La cámara de caucho de butilo contiene el fluido de calentamiento, esta facilita el proceso de transferencia de calor dentro de la prensa. El vapor es retenido en la estructura de dicha cámara de manera tal que le permita funcionar como medio de transferencia de calor. Una vez que la prensa se acciona el bladder se expande como producto del fluido contenido y el efecto de la presión ejercida para darle forma al neumático.

Tal y como se puede observar de los párrafos anteriores, el neumático recibe un fenómeno de transferencia de calor conductivo tanto a nivel de las secciones del molde de la prensa como del bladder, lo que permite que el proceso sea mucho más eficiente. La ecuación de Fourier es la encargada de denotar este mecanismo de transferencia de calor. Esta ley evidencia la relación existente entre la tasa de tiempo para la transferencia de calor en un material, en relación con su proporcionalidad al gradiente negativo de la temperatura y el área de transferencia en contacto. Es decir, se indica que el flujo de calor irá de la región con mayor temperatura a la región con menor temperatura.

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Dónde:

Q calor transferido, J.

k Constante de conductividad térmica del material, adim.

A Area de transferencia, m^2 .

dT/dx Cambio de temperatura en función de la posición, K/m.

Para este caso en específico lo que ocurrirá es que una vez que inicie el ciclo de vulcanizado establecido, las secciones del neumático que se encuentren en un contacto más directo con las superficies calientes se vulcanizarán primero, de manera tal, que se dará el grandiente de temperatura que se denota en la ecuación anterior mediante la expresión del término diferencial, en donde, este parámetro irá cambiando en función de la posición, es decir, a lo largo del material.

Finalmente, se dice que el proceso de vulcanizado ha finalizado una vez que se alcance el 90 % del ciclo del vulcanizado, en este punto, ya se tiene el grado óptimo de curado del hule. A nivel industrial este grado de avance de reacción es cuantificable haciendo uso del método de ensayo de reometría de vulcanización, del cual se comentará más adelante.

2.2. Aspectos relacionados al efecto de curado de los ciclos de vulcanización

Existen una serie de parámetros empleados a nivel industrial cuando a un proceso de curado de hule respecta. Para el presente trabajo es necesario tener conocimiento de dicha terminología para poder lograr el entendimiento del proceso. A continuación, se mencionan algunos de ellos (Faulk, 2017) :

2.2.1. Efecto de Curado

El efecto de curado o también conocido como *Cure Effect* (CEF) por sus siglas en inglés corresponde a la fracción óptima alcanzada para el tiempo de curado. Para obtener su valor es necesario dividir el curado equivalente (CE) entre el mejor tiempo de curado (BCT) por sus siglas en inglés.

2.2.2. Mejor tiempo de curado

Este comúnmente es conocido como *Best cure time* (BCT) y es el referente al tiempo óptimo de curado de un hule. Es utilizado para el cálculo de la capacidad del proceso. El BCT corresponde a una constante definida por la Corporación, el valor de dicha constante varía según el hule con el que se esté trabajando. A partir de la multiplicación entre la constante y la desviación estándar obtenida por tipo de hule es que se obtiene el resultado de la capacidad del proceso.

2.2.3. Cálculo del curado equivalente

El curado equivalente conocido por su abreviatura como CE, corresponde a la tasa de curado para un compuesto a una temperatura dada en relación con la tasa de curado de ese mismo compuesto a una temperatura de referencia.

$$CE = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a R * (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}})}{E_a R * (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}})}\right) dt \quad (4)$$

Dónde:

CE	Curado Equivalente, adim.
R	Constante de los gases, kcal/mol*K.
E_a	Energía de activación, kcal/mol.
T_{ref}	Temperatura de referencia, K.
T	Promedio de la temperatura sobre el incremento del tiempo en t, K.
t	Incremento del tiempo, s.

dt Diferencial del tiempo, adim.

2.2.4. Cálculo del factor de seguridad

El factor de seguridad corresponde a un valor que es contemplado de manera adicional al tiempo de curado que se tiene establecido para operar el ciclo de vulcanización del hule en la prensa. Este factor contempla las posibles desviaciones del proceso que podrían ocasionar que el hule no quede totalmente curado o presente problemas de porosidad. Para obtener este dato se hace uso de los siguientes cálculos:

$$\chi = 4 * \sqrt{\sum (\sigma_i * W_i)^2} \quad (5)$$

χ Tiempo de seguridad, s.

σ_i Variación de cada factor, s.

W_i El grado de afectación sobre el curado equivalente por cada factor, adim .

$$\theta = \frac{\chi}{\tau} \quad (6)$$

θ Factor de seguridad, adim.

χ Tiempo de seguridad, s.

τ Tiempo de la prueba de poro, s.

2.3. Pruebas de porosidad

Llevar a cabo el proceso de vulcanización no es un tarea sencilla, como se mencionó en párrafos anteriores de acuerdo al grado de curado que se obtenga así será la condición del hule vulcanizado final. Es por esto que una manera de tener un control del ciclo de vulcanización es realizando pruebas de porosidad, mediante estas pruebas se obtiene

el tiempo requerido para que el material logre vulcanizar dentro de la prensa una vez iniciado el proceso.

En la industria del caucho el estudio de este factor es fundamental, la formación de una estructura porosa en compuestos de esta naturaleza se produce como resultado de una combinación de procesos fisicoquímicos, que se derivan del proceso de la obtención del producto tridimensional en la etapa de vulcanización.

La porosidad se puede definir en términos de la aparición de burbujas de diferentes dimensiones en el material. Así la formación de burbujas en fluidos newtonianos y no newtonianos es un tema que abarca varios aspectos, cubre el fenómeno de ebullición, soluciones sobresaturadas y la cavitación; todos estos fenómenos son físicamente similares, ya que envuelven el incremento en la presión de vapor dentro del fluido con respecto a la presión externa, una razón común de este comportamiento es que el fluido contiene materiales volátiles como parte del proceso de mezclado para lograr la composición de la mezcla deseada (Kasner y Meincke, sf).

Para un elastómero la formación de burbujas tradicionalmente está vinculada a dos fenómenos: la cavitación y la descompresión explosiva. Para el primer caso es cuando se da una microfractura en el mecanismo, como respuesta a una presión hidrostática negativa dentro del fluido, la cual ocurre por tensión triaxial o por efecto de la presión externa en una mezcla de caucho sobresaturada de gas. El segundo caso corresponde a una descompresión explosiva, en donde nuevamente se presenta una sobresaturación de gas que implica una alta presión externa, creando fracturas en la estructura del elastómero que se visualizan como la formación de burbujas de gran tamaño (Kasner y Meincke, sf).

2.3.1. Factores que afectan la porosidad

Una vez que inicia el proceso de vulcanización, comienza la formación de poros en el elastómero. Existen diversos factores que influyen en la aparición de burbujas, dependiendo de la complejidad del proceso, a continuación, se mencionará brevemente

sobre ellos (Kasner y Meincke, sf).

- Presencia de materiales volátiles: Solo una pequeña fracción de los materiales volátiles agregados a la mezcla son disueltos, altas fracciones de estos componentes que no son absorbidos generan dos implicaciones en la formación de las burbujas, como primer caso se tiene que hay una pobre dispersión de la mezcla debido a la alta concentración de los componentes volátiles, promoviendo la formación de burbujas, como segundo punto la alta volatilidad durante la vulcanización envuelve el fenómeno de desorción, disolución y dificultad en la transferencia de masa. Adicionalmente, la descomposición de estos materiales durante la vulcanización puede generar cambios en la presión del fluido.
- Presencia de aire: Una causa de la formación de poros es que parte del aire que se genera del proceso mecánico de la prensa utilizada para vulcanización, o en la etapa de mezclado quede atrapado en el material.
- Efecto de la composición y mezclado: Ambos factores tienen un efecto significativo en la porosidad del hule. Un proceso de mezclado ineficiente genera una dispersión incompleta de los ingredientes, ocasionando aglomeraciones del material que dan lugar a sitios de nucleación de burbujas. Además, una baja viscosidad de la mezcla ocasiona un incremento en la porosidad del fluido.
- Efecto de la vulcanización: Se ha demostrado que una alta temperatura de vulcanización y una baja presión promueven la formación de superficies porosas en el material.

2.3.2. Prueba de poro

La prueba de porosidad es utilizada para determinar el grado mínimo de curado requerido en la llanta, es decir, permite fijar el tiempo mínimo necesario par llevar a cabo el proceso.

Para esta prueba se utiliza el perfil del neumático al cual se le analizan los puntos críticos(zonas con puntos rojos), Figura 2.3

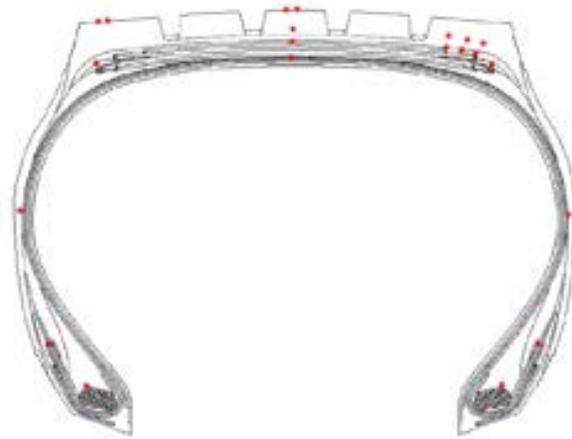


Figura 2.3. Puntos críticos de un neumático (Faulk, 2017).

Esta consiste en tomar dicha sección ya vulcanizada previamente, y analizar visualmente la aparición de poro en estos puntos, en caso de encontrar porosidad se anota la distancia a la que se encuentra el poro, dicha medición se realiza mediante una regla calibrada. A partir, de esta verificación se logra determinar si con el ciclo de vulcanizado fijado, el neumático está logrando el grado de vulcanización requerido, o si por el contrario es necesario restablecer el tiempo de curado a fin de lograr que se cumpla esta condición.

Para llevar acabo el análisis se toman distintos perfiles del mismo neumático, vulcanizados bajo distintos tiempos de ciclo. Cada uno de estos perfiles se examina buscando indicios de poro. Si en dicha verificación se detecta mucha porosidad se parte del criterio que el tiempo fijado para el ciclo de vulcanizado no es suficiente, y por ende el neumático está obteniendo la condición de *crudo*.

De esta manera se va aumentando el tiempo hasta obtener un punto en donde la porosidad sea nula en estos puntos críticos, indicando que este corresponde al valor mínimo que se debe fijar en la prensa de vulcanización para asegurar que la llanta vulcanice.

No obstante, al ser la vulcanización un proceso tan sensible a cambios de temperatura

es necesario asegurar que el tiempo que se defina cubra posibles variaciones en el proceso, es por esto que se realizan una serie de cálculos a nivel operativo donde se aplican correcciones de este parámetro así como un respectivo factor de seguridad asociado al mismo.

2.3.3. Prueba de termopares

Por otra parte, la prueba de termopares también corresponde a una medición ejecutada que permite monitorear el grado de curado del neumático, a través de la toma de datos de temperatura en función del tiempo.

Dicha prueba consiste en insertar los termopares en puntos estratégicos del neumático, establecidos a nivel corporativo. Una vez que estas son fijadas se coloca la llanta en la prensa de vulcanización y se ejecuta el proceso (inicio del ciclo). Estos termopares comienzan a registrar datos de temperatura en distintos puntos del neumático conforme transcurre el tiempo en la prensa, al alcanzar aproximadamente los 100°C inicia el registro de datos para efecto del proceso de curado.

Mediante la relación existente entre temperatura y efecto de curado (CE) se puede determinar cuando se alcanza el grado adecuado de curado. Para ello se tiene un valor de CE establecido a nivel corporativo, una vez que se detecta este valor es posible conocer cuál sección del neumático es la última en vulcanizar, indicando que el proceso de curado ha alcanzado el nivel deseado, y adicionalmente, a la detección del lugar crítico de curado, también se obtiene información sobre la temperatura bajo la cuál se alcanzó tal condición.

2.3.4. Prueba de punto de soplo (Blow Point)

Como ya se comentó la porosidad de un elastómero se relaciona con la aparición de burbujas, así el Blow Point el cuál se traduce en castellano como punto de soplo, es la terminología utilizada para hacer referencia al grado mínimo de vulcanización necesario para la ausencia de poro, es decir, el menor grado al que requiere ser curado

el compuesto. Este punto de sople se genera cuando el material del caucho vulcaniza bajo presión y se lleva a un estado no presurizado para completar dicha etapa, dando con ello la formación de estas imperfecciones en el material (Kasner y Meincke, sf).

En un proceso de fabricación de neumáticos, específicamente en la etapa de vulcanización cuando se lleva a cabo una insuficiencia en el tratamiento térmico a raíz de la falta de temperatura o el tiempo de curado, se desencadena el fenómeno de aparición de burbujas dentro del neumático. Esta situación es indeseable a nivel productivo puesto que representa una fuente exacta de explosión del neumático en uso. Por otro lado, un curado excesivo del producto también genera problemas en las propiedades intrínsecas del material, se da una disminución de la elasticidad en el mismo, se pierde flexibilidad a bajas temperaturas como respuesta al efecto en la viscoelasticidad de este, y adicionalmente también se produce una reducción en la eficiencia del proceso productivo

Es por esto que es de importancia llevar un adecuado control del curado del compuesto, a fin de verificar la aparición de estas burbujas y darse cuenta del efecto de curado del material, para ello una forma aplicada a nivel industrial es mediante la prueba de Blow Point, la cual es ejecutada haciendo uso del un dispositivo conocido como *Blow Point Analyzer*(Analizador de blow point) el cual se comentará más adelante (Capítulo 4) .

A diferencia de la prueba de poro y la de termocupla esta medición se enfoca en obtener el dato de un único compuesto (hule) y no del neumático, en el Capítulo IV se hará especial énfasis en la función, metodología y resultados arrojados de la misma.

2.4. Otras pruebas de interés

2.4.1. Prueba de Reometría

La reometría aunque no se encuentra asociada a la porosidad en el hule como las pruebas mencionadas anteriormente, sí corresponde a una medición vinculada al avance de la reacción en el hule, es decir, al grado de vulcanización. La reometría de vulcanización brinda información relevante sobre el tiempo de curado del hule.

Para ejecutar la prueba se hace uso de un reómetro. El reómetro es uno de los dispositivos más utilizados a nivel industrial para el control de variables involucradas en un proceso de fabricación de llantas.

Permite determinar relaciones cuantitativas y cualitativas de deformación y tensión mecánica. Por ende, con un reómetro es posible medir la relación existente entre el esfuerzo y la deformación del material. (Ramirez, 2006).

Mediante este dispositivo es posible monitorear el hule fabricado, de tal manera, que se pueda asegurar que este cumple con las especificaciones establecidas previo a realizar el proceso de vulcanización.

Para llevar acabo tal labor se mide el torque del material en estado isotérmico, en función del tiempo. A través de un rotor se genera la oscilación de la muestra a medir, este se coloca en una cavidad presurizada, en donde una de las secciones se encarga de hacer el movimiento de rotación y la otra cuenta con un sensor que detecta esta señal, convirtiéndola mediante un arreglo matemático en valores de torque. Ambos platos de la cavidad se encuentran a la temperatura fijada en el equipo, de manera que se cree una transferencia de calor uniforme a través del área superficial de la muestra (Dick, 1992).

Conforme avanza el tiempo de la prueba se presenta una respuesta del avance de la reacción en función de la formación de puentes de entrecruzamiento activos en el elastómero. Por ello, existen puntos que se han fijado como referencia para el

monitoreo del método, de tal manera, que se obtenga información relevante sobre las características deseadas del material, dentro de los cuales se encuentran el torque mínimo, los tiempos de curado TC50, TC90 y el torque máximo.

El torque mínimo (ML) por sus siglas en inglés, es un indicador de la rigidez y viscosidad del compuesto no vulcanizado. A medida que el compuesto se calienta bajo presión, la viscosidad disminuye y con ello el torque, dando como resultado el valor más bajo de la curva registrado por el módulo como ML.

Por otra parte, una vez que da inicio el curado del material el par (fuerza) aumenta proporcionalmente, conforme avanza el tiempo este par alcanza el valor máximo, y es este punto dónde se obtiene lo que se conoce como torque máximo (MH). En este momento el compuesto se encuentra en su punto óptimo de curado.

Cabe resaltar que dependiendo del tipo de compuesto que se esté tratando, la pendiente de torsión creciente varía, mostrando un comportamiento diferente en cada caso (Sezna y Dick, 1991).

Como parte de la información obtenida del método de medición también se deplegan los datos respectivos del TC50 y TC90, siendo estos los correspondientes al momento en que el entrecruzamiento en el elastómero ha alcanzado el avance de 50 % y el 90 % respectivamente. A partir de este dato se puede obtener información de interés en el análisis de la muestra, por ejemplo, en el caso del TC50 este indica el avance de la reacción en dicho tiempo, si el valor es inferior de acuerdo a las especificaciones establecidas como parte del control productivo, quiere decir que el compuesto puede presentar problemas para vulcanizar. Por el contrario, si se obtiene un valor superior a lo indicado el hule podría comenzar a presentar problemas de graneado, es decir, vulcanizaría antes de llegar a la prensa de curado (Dick, 1992). A continuación, en la Figura 2.4 se demuestra el comportamiento típico de una reometría de vulcanización.

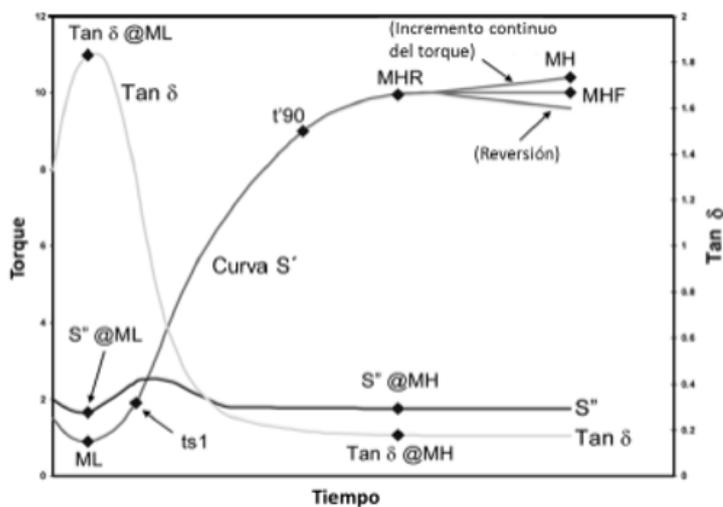


Figura 2.4. Cambio estructural en las moléculas del caucho con y sin el proceso de vulcanización, descrito en un análisis reométrico para observar el comportamiento del torque a lo largo del tiempo en el material (Ramírez, 2006).

Como se puede observar de la misma se pueden obtener los tiempos y torques durante el avance de la reacción, además se puede conocer el momento en que se logra la estabilización del torque, así como su disminución luego de haber alcanzado el valor máximo, este fenómeno de retroceso en la curva se conoce como reversión y se encuentra relacionado con la desulfurización de los compuestos.

Con base a esta curva generada se pueden determinar diversas características que presenta el material a lo largo del tiempo, las cuales se enlistan a continuación (Ramírez, 2006):

✓ Inferior al valor óptimo de vulcanizado:

- Resistencia del material a la abrasión
- Resistencia al crecimiento de grietas
- Resistencia al desgarre mecánico

✓ En el punto de vulcanización óptimo:

- Resistencia a la tensión

- Resistencia al envejecimiento

✓ Superior al valor óptimo de vulcanizado:

- Elasticidad
- Amortiguamiento dinámico
- Flexibilidad a baja temperatura

Finalmente, aunque lo expuesto con anterioridad hace alusión al control en el proceso de vulcanizado, cabe indicar que la reometría es utilizada para el análisis de las muestras posterior a la etapa de mezclado. En esta etapa pueden existir variaciones a nivel de formulación que influyen en las propiedades del material, por ende, a fin de obtener el material deseado es importante llevar a cabo un control de los hules producidos, de manera tal, que se cumplan con las especificaciones previo a continuar con las siguientes etapas del proceso en donde se va a utilizar el material evaluado. En el caso de que la muestra analizada no cumpla con lo establecido, el proceso de mezclado para dicho compuesto debe ser reevaluado.

2.4.2. Prueba de Dispersión

El negro de humo es el material utilizado como relleno de refuerzo más importante para los cauchos. Su incorporación a la mezcla proporciona generalmente propiedades como: mejor resistencia, extensibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia a la abrasión, etc.

En una mezcla siempre se desea que sus materiales queden suficientemente dispersos, asegurando la homogeneidad de la misma, logrando consistencia en las propiedades a lo largo del material.

Se dice que en la industria del caucho buena dispersión de este material es importante, puesto que presenta beneficios sobre las propiedades del material vulcanizado. Para el estudio de la dispersión en materiales existen varios métodos, sin embargo, para este tipo de industria la mayoría de métodos actuales se basan en alguna forma de microscopía.

La microscopía de campo dividido, consiste en que el microscopio se encuentra previsto de dos lentes, acomodados en un arreglo de espejos o prisma, los cuales son utilizados para examinar las estructuras sobre la superficie de la muestra.

Para su funcionamiento, primero se debe de cortar la muestra a analizar, en 5 secciones, analizando cada una de las superficies o caras de la misma, el espécimen es iluminado por una lámpara que se encuentra a un ángulo de 30° , mientras otra lámpara ilumina desde atrás un estándar de fotografías que se encuentra contenido en el equipo, estas fotografías corresponden a un estándar del grado de dispersión del material, es un rango de 1-10. Finalmente mediante una medición de aproximadamente un minuto, el dispositivo realiza una comparación en donde se identifica cual estándar de fotografía es el que mejor se adapta al espécimen (Persson, 1994). La facilidad y rapidez con la que se realiza esta prueba, es una condición esencial para su elección.

2.5. Determinación de la capacidad de un proceso

Por otro lado un concepto importante a considerar en el desarrollo de la práctica es la capacidad del proceso. La capacidad de un proceso, la cual se encuentra vinculada a la aptitud con la que este cuenta para generar los artículos de acuerdo a las especificaciones requeridas. Al realizar el análisis estadístico de la capacidad de un proceso se suele iniciar con el estudio de las estimaciones para los parámetros que definen el funcionamiento de este, especialmente de aquellos parámetros que afectan la variabilidad. (Wooluru *et al.*, 2014)

A nivel industrial existen una serie de factores de carácter aleatorio que pueden generar que los productos que inicialmente se elaboraron bajo el supuesto de las mismas condiciones de producción no sean exactamente iguales. Dicho de otra manera, las características del producto fabricado no son uniformes y presentan variabilidad. Esta variabilidad claramente es indeseable y el objetivo de la empresa será lograr una reducción de la misma, o al menos mantenerla dentro de los límites fijados.

Es por esto que el control estadístico de procesos se ha convertido en una herramienta

para lograr dicho objetivo, ayudando a la mejora en la calidad de producción (Farina y González, 1998).

2.5.1. Control estadístico de procesos

El control de la calidad dió paso al inicio del control estadístico de procesos, conocido por sus siglas en inglés como S.P.C.

Un S.P.C se enfoca en el análisis de la calidad en la etapa de fabricación del producto. Se practica sobre muestras representativas de lotes de producción y no sobre todos los productos, el fin de un S.P.C es identificar las causas de algún desajuste o variación de proceso para solucionarlo. Es por lo anterior que un S.P.C se encarga de la recolección de información sobre las características físicas del producto, por ejemplo, longitud, peso, diámetro, o en variables del proceso: temperatura, presión, etc (Farina y González, 1998).

2.5.2. Variación de un proceso

En un proceso es importante tener control de la variación que se genere del mismo, de manera tal que se pueda asegurar que las condiciones bajo las que se lleva a cabo este sean constantes a través del tiempo. La variabilidad se encuentra relacionada a la dispersión de los datos analizados, indica si los valores o puntuaciones son próximas entre sí o si por el contrario se alejan una de otras.

Industrialmente un proceso puede encontrarse afectado por un gran número de factores, por ejemplo, oscilaciones de las características del material utilizado, variaciones de temperatura, humedad ambiental, variabilidad introducida por el factor humano, repetibilidad propia de la maquinaria utilizada, etc.

Existen dos situaciones que pueden surgir a raíz de dichas oscilaciones, si ninguno de los factores asociados presenta un efecto preponderante sobre los demás es probable que la característica de calidad del producto fabricado se distribuya de una manera

normal, por ende, al conjunto de esta multitud de factores se le denominan causas comunes. Si por el contrario, uno de los factores asociados es preponderante sobre los demás, entonces la distribución de las característica de calidad no tiene porque seguir una distribución normal, indicando que está presente una causa especial o asignable de variación (Rojas, 2016).

Ahora bien, para el caso de este trabajo se realiza el enfoque de dichas variaciones asociadas al impacto de las mismas en la etapa de curado del hule. Como en la mayoría de los casos siempre es deseable a nivel industrial producir más en menor tiempo, lo anterior siempre y cuando se mantengan los estándares de calidad del producto, definido por la empresa. Es por esto, que para la misma es necesario asegurar que las llantas no queden crudas posterior al proceso de vulcanizado. Por ello es fundamental establecer un margen de seguridad que contemple la variación de los valores asociados a las fuentes de variabilidad del proceso, en este caso corresponde al factor de seguridad, el cual contempla 7 variaciones asociadas al proceso. (Faulk, 2017).

Una vez identificados los factores asociados es necesario conocer cual corresponde a la variación total del proceso, que se puede ver representada en su manera simplificada de la siguiente manera, sin embargo, corresponde a la sumatoria de cada uno de los factores anteriormente mencionados:

$$\sigma_T = \sqrt{\sum (\sigma_i * W_i)^2} \quad (7)$$

Dónde:

- σ_T Variación total, adim.
- σ_i Variación de cada factor, adim.
- W_i El grado de afectación sobre el curado equivalente por cada factor, adim.

Adicionalmente, como parte del control de la variabilidad se puede tener conocimiento sobre el porcentaje de contribución de cada variable, con la siguiente ecuación se

puede obtener este dato.

$$\text{Porcentaje de Contribucion} = \frac{(\sigma_i * W_i)}{\sigma_T^2} * 100 \quad (8)$$

Dónde:

σ_T Variación total, adim.

σ_i Variación de cada factor, adim.

W_i El grado de afectación sobre el curado equivalente por cada factor, adim.

2.6. Análisis estadísticos en el control de procesos.

Por otra parte, también es importante considerar para el desarrollo de la presente práctica, la conceptualización de cierta terminología estadística. La estadística es una herramienta básica en negocios y producción. Es usada para entender la variabilidad de sistemas de medición, control de procesos así como el control estadístico de procesos, para compilar datos y para tomar decisiones. En estas aplicaciones es una herramienta clave. La estadística aplicada busca implementar los procesos probabilísticos y estadísticos de análisis e interpretación de datos o características de un conjunto de elementos al entorno industrial, a efectos de ayudar en la toma de decisiones y en el control de los procesos industriales y organizacionales (Martínez y Marí, sf).

2.6.1. Prueba de Normalidad

Dentro del análisis estadístico se encuentra una importante herramienta, la cual corresponde al análisis de distribución normal, el cual se utilizará como parte de la ejecución de esta práctica dirigida.

La distribución normal fue desarrollada por Abraham de Moivre. Posteriormente,

Carl Friederich Gauss elaboró desarrollos más profundos y formuló la ecuación de la curva de Gauss, conocida más comúnmente como campana de Gauss. La distribución de una variable normal se encuentra determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar (Martínez y Marí, sf).

El análisis de una prueba de normalidad tiene como objetivo principal determinar cuánto difiere la distribución de los datos observados respecto a lo esperado si procedieran de una distribución normal, es decir, si todos los datos presentan la misma media y desviación típica.

2.6.2. Análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R)

En una industria que se quiera avanzar en programas de mejoramiento de la calidad es necesario contar, entre otras cosas con un sistema de medición confiable.

Los métodos de medición o ensayos usualmente requieren ser patrones de medición reproducibles. Los resultados obtenidos de estos están sujetos a una incertidumbre (Gallor, 2019).

Cuando un proceso no cumple con esta condición de reproducibilidad, se dice que no es capaz, y se deben de buscar oportunidades de mejora para el desempeño del método, cumpliendo con los requerimientos para el que fue diseñado.

Un estudio de este tipo determina que en parte la variación observada en el proceso se debe al sistema de medición utilizado.

- **Análisis de Repetibilidad:** La repetibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de dispersión de los datos. Se dice que este término hace referencia a la proximidad de concordancia entre valores de mediciones sucesivas, en las cuales se encuentra involucrado un único mesurando bajo las mismas condiciones de medición.

Dentro de estas condiciones se contempla: el mismo procedimiento para ejecutar la medición, el mismo observador, el mismo instrumento de medición asegurando que sus condiciones de operación no presenten alguna variante y

un mismo lugar, todo lo anterior en un lapso de tiempo corto. Sin embargo, en este caso es común evaluar que tanto se desvían los resultados en la medición realizada por un mismo observador. (Portuondo y Portuondo, 2010). En la Figura 2.5 se observa gráficamente dicho concepto.

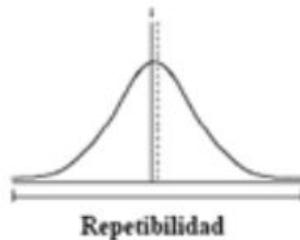


Figura 2.5. Representación gráfica del concepto de repetibilidad (Portuondo y Portuondo, 2010).

- **Análisis de Reproducibilidad:** Por otra parte, la reproducibilidad se define como la proximidad de concordancia entre los valores en mediciones sucesivas del mismo mesurando pero bajo condiciones de medición que cambian. Las condiciones de operación que podrían cambiar son: principio de medición, método de medición, observador, instrumento de medición, patrón de referencia, lugar, condiciones de uso y tiempo. Sin embargo, es común evaluar en esta caso la variación provocada por el cambio de observador (Portuondo y Portuondo, 2010). En la Figura 2.6 se observa gráficamente dicho concepto.



Figura 2.6. Representación gráfica del concepto de reproducibilidad (Portuondo y Portuondo, 2010).

2.7. Herramientas de análisis estadísticos en el control de procesos.

De esta manera en una organización cuando se quiere implemetar alguna mejora en temas relacionados a la calidad del producto, se utiliza como respaldo el uso de herramientas de calidad como base estadística para el mejoramiento continuo de los procesos.

Por medio de la utilización de estas herramientas es posible encontrar los problemas causantes de las fallas que se pueden tener a nivel organizacional, priorizándolas, y porteriormente buscando sus respectivas soluciones. Para ello se elaboran planes con su implementación, logrando con esto mejoras a nivel de proceso (García y Portocarrero, 2019).

La mejora continua se efectúa con la utilización de las herramientas de la calidad convenientes para cada fase. A lo largo del tiempo se han creado heramientas de calidad, estas se dividen en herramientas estadísticas de calidad y herramientas de mejora. Para la aplicación de muchas de estas herramientas se necesita la recolección de datos estadísticos, así como la la aplicación de métodos científicos.

A continuación se enlistan algunas de estas (García y Portocarrero, 2019):

Herramientas estadísticas de calidad:

- Histogramas
- Diagrama de pareto
- Diagrama Causa-Efecto (Ishikawa)
- Hojas de comprobación o lista de chequeo
- Gráficas de control
- Diagramas de dispersión

- Estratificación
- Diagrama de afinidad
- Diagrama de flechas
- Diagrama de matriz

Herramientas de mejora:

- Autoevaluación
- Evaluación comparativa
- Manual de calidad
- Documentación de procesos y del sistema de gestión de calidad
- Dinámica de grupos
- Gestión de procesos

En ambos casos se mencionan únicamente algunas de las herramientas existentes, sin embargo en la actualidad se cuentan con muchas más.

Para el presente trabajo se procedió a utilizar algunas de estas herramientas como medio facilitador para el análisis de la información, específicamente del tipo estadístico. A continuación, se da una breve explicación sobre aquellas de interés.

2.7.1. Gráficos de control

Un gráfico de control es una herramienta muy utilizada a nivel industrial para demostrar de manera clara y consistente el estado que guarda un proceso. Con este tipo de gráfico es relativamente fácil darse cuenta si un proceso se encuentra fuera de control, o si está experimentando situaciones que ocasionen una variación en los resultados obtenidos de este proceso (Izar y González, 2004). Un gráfico de control consiste básicamente en una línea central, marcada por la media de la variable que

se está monitoreando, y dos líneas límite conocidas como límites de control superior e inferior, las cuales se encargan de señalar los valores dentro de los cuales se espera deberá moverse la variable del proceso. En algunas ocasiones los límites de control son establecidos a ± 3 desviaciones estándar de la media.

A continuación se adjunta una imagen ilustrativa de un gráfico de control.

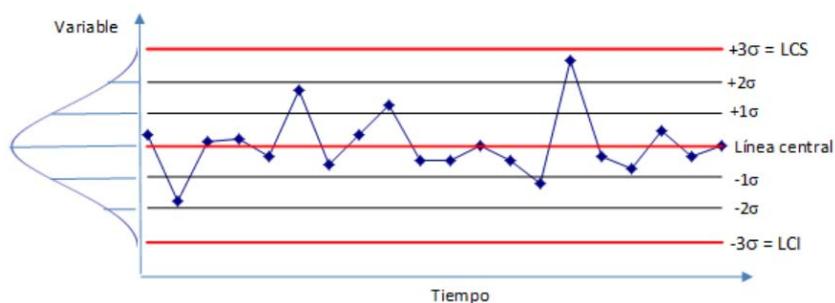


Figura 2.7. Ejemplo de un gráfico de control (*Izar y González, 2004*).

En cuanto a su interpretación, se dice que un proceso está bajo control cuando todos los datos se encuentran en medio de los límites inferior y superior.

2.7.2. Gráficos de dispersión

En muchas ocasiones en las industrias o en la vida cotidiana se presenta el interés de conocer si existe correlación entre variables de estudio. Dentro de este tema cabe destacar la importancia y utilización de los diagramas de dispersión, los cuales sirven para representar y analizar la relación de dependencia entre dos variables referidas al mismo conjunto de datos, y como medio gráfico para introducir su estudio (Estepa, 2008)

Un diagrama de dispersión permite obtener conocimiento sobre el comportamiento de los datos, es decir, sugiere la forma en la que se encuentran relacionadas las variables, ya sea de manera lineal, cuadrática, cúbica o de algún otro tipo. A partir de la información arrojada se puede tener un acercamiento a la interpretación de los coeficientes de correlación o en su defecto del modelo matemático de regresión.

Con un gráfico de dispersión también se puede identificar patrones, tendencias o clusters de los datos, y con una debida comprensión de esta información es posible trazar una línea recta que se aproxime a la recta de regresión real de los datos (Estepa, 2008). A continuación se adjunta un ejemplo de un diagrama de dispersión.

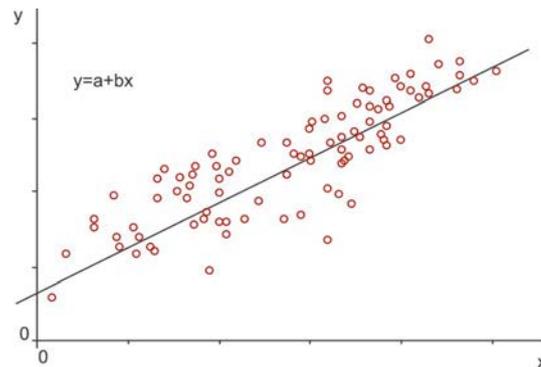


Figura 2.8. Ejemplo de un gráfico de dispersión (Estepa, 2008).

Cada punto del diagrama da paso a la configuración en el plano de los puntos, y como se mencionó anteriormente da como respuesta una tendencia o patrón de los datos. Este patrón permite determinar el tipo e intensidad de correlación entre las variables. De esta manera, si los datos se agrupan formando una línea recta se dice que la asociación entre las variables es perfecta, es decir, existe dependencia funcional, en consecuencia la correlación lineal será la más alta.

Si los datos alrededor de la recta presentan una pendiente positiva, la relación entre las variables será directa positiva. Si los datos presentan pendiente negativa, la relación entre las variables es inversa negativa.

Por otra parte, si los datos siguen una línea curva, entonces se dice que la relación entre las variables es no lineal, y, aunque es posible calcular el coeficiente de correlación lineal, en este caso no es recomendable generar una asociación entre las variables de estudio, ya que los puntos no se encuentran mostrando una tendencia a agruparse, lo cual indica que la correlación entre datos es muy baja o nula.

Finalmente, cabe mencionar que un gráfico de dispersión es una herramienta especialmente útil para un conjunto de datos bivariados (dos factores) (Estepa, 2008).

2.7.3. Diagrama Causa-Efecto

El nivel de dispersión de una variable es un aspecto industrial que se debería de tener bajo control e intentar minimizar su impacto. Lo anterior responde a la necesidad de evadir el peligro en generar piezas inadecuados para su uso, por ejemplo, en ocasiones en ciertas industrias las dimensiones de estas piezas se desvían de las fronteras de tolerancia especificadas, ocasionando limitantes en la calidad del producto. El diagrama de causa-efecto o comúnmente también conocido como Ishikawa, es una herramienta ampliamente usada para el control de calidad en estos casos, este parte del principio de examinar y controlar específicamente 5 variables primordiales, nombradas como las 5 M's, siendo estas las que se enlistan a continuación: (González, 2014). En la Figura 2.9 se representa la manera en la que se visualiza un diagrama de Ishikawa:

- Materias primas
- Maquinaria
- Métodos de trabajo
- Mano de obra
- Medio ambiente

Esta herramienta es una técnica utilizada para identificar las posibles causas de un problema central, además permite mejorar procesos y los recursos en una organización. A partir, de este diagrama se muestran los resultados insatisfactorios, también conocidos como efectos, e identifica los factores o causas que los originan.

Por otra parte, para la elaboración de este diagrama se suele seguir dos caminos, el primero consiste en formular una lluvia de ideas con varias personas sobre el posible problema y que lo está ocasionando, mientras que el segundo camino consiste en determinar la idea principal sobre el problema, graficarla y por medio de los *huesos* (también se conoce como diagrama de pez) del diagrama ir reconociendo las

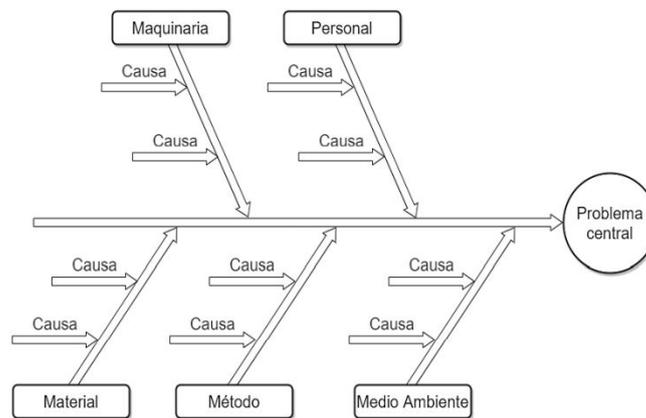


Figura 2.9. Ejemplo de un diagrama de Ishikawa (González, 2014).

causas secundarias del problema.

Estimación de la incertidumbre de medición

Como ya se comentó el diagrama de Ishikawa posee mucha aplicabilidad a nivel industrial, ya que permite la globalización de factores de interés para su respectivo estudio. Es por esto que para la estimación de la incertidumbre se parte de su utilización, una vez identificados los factores o causas que están originando el problema, es importante evaluar su impacto real en el mismo.

Y es en este punto donde aparece el término de incertidumbre. De acuerdo a lo establecido por la GUM (Guía para la expresión de la incertidumbre de medida) esta terminología hace referencia al parámetro asociado al resultado de una medida, que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente pueden ser atribuidos al mesurando (Hernández, 2012).

La importancia de contemplar la incertidumbre como parte del problema se basa en que una medida sin una indicación cuantitativa de la calidad del resultado es inservible, de esta manera al no conocer la incertidumbre asociada a una medición se generan dudas sobre la validez del resultado.

Finalmente, de manera breve se enlistan algunas de las posibles causas de incertidumbre en una medición (Hernández, 2012):

- Conocimiento inadecuado de los efectos de las condiciones ambientales sobre la medición, o medición imperfecta de dichas condiciones ambientales.
- Lectura sesgada de instrumentos analógicos, por parte del operador.
- Resolución del instrumento de medida.
- Aproximaciones y suposiciones establecidas en el método y procedimiento de medición.
- Variaciones en la repetición de las observaciones del mensurando bajo condiciones aparentemente idénticas.

Ahora bien, basado en la guía *Evaluation of measurement data* (Evaluación de los datos de medición) en donde se prevén una serie de reglas generales para evaluar y expresar la incertidumbre en una medición, se plantean los siguientes pasos a seguir para la ejecución del cálculo, evidenciados en la Figura 2.10 (Joint, 2008).

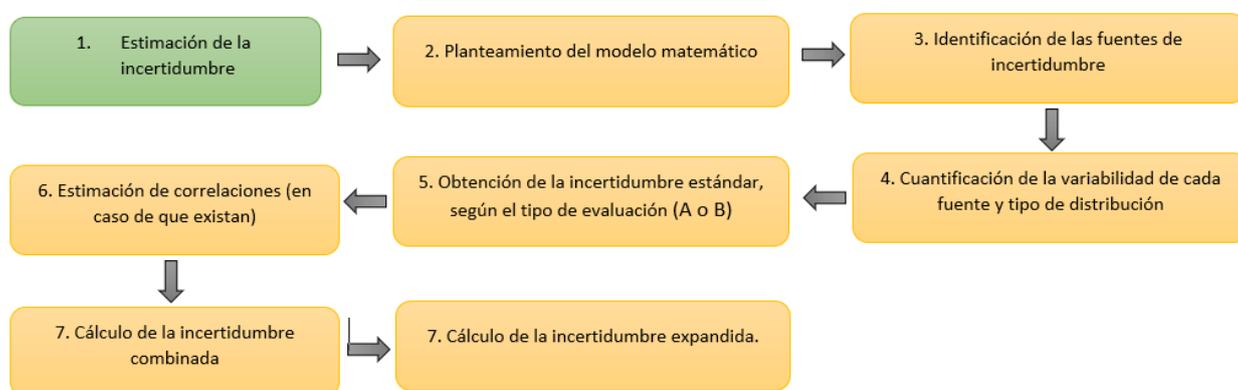


Figura 2.10. Pasos para la estimación de la incertidumbre (*Elaboración propia*)

2.8. Estandarización de métodos de medición

Los procesos estandarizados son una de las principales características de las industrias, si estos se aplican de manera adecuada se puede obtener un impacto positivo,

mejorando los estándares de calidad y la mejora continua de la industria, logrando altos niveles de competitividad.

Se denomina estandarización al proceso de unificación de características en un producto, servicio, procedimiento, etc. Este implica en muchas ocasiones la redacción de normas de índole prescriptiva que deben seguirse con la finalidad de conseguir el objetivo de la empresa. Cuando se crea un estándar se da la recolección y documentación de la información acerca del funcionamiento (quién, cómo, cuándo) de los procesos, de una manera clara, precisa, exacta y de fácil comprensión (Castillo, 2017).

Dentro de los beneficios establecer un estándar se encuentran: eliminar la variabilidad de procesos, asegurar resultados esperados, optimizar el uso de materiales y herramientas, mejorar la calidad y seguridad dentro de la organización, etc.

Actualmente, existen herramientas que permiten la estandarización de procesos. Dentro de las utilizadas para la realización del trabajo se encuentran: la lista de chequeo y la ayuda visual.

2.8.1. Lista de Chequeo

La lista de chequeo es una herramienta del tipo informativo, también es conocida como lista de control u hoja de verificación.

Corresponde a una herramienta metodológica compuesta por una serie de ítems, factores, propiedades, aspectos, componentes, criterios, dimensiones o comportamientos, necesarios de tomarse en cuenta, para realizar una tarea, controlar y evaluar detalladamente su desarrollo, en un evento, producto o actividad. Estos componentes se organizan de manera coherente, en orden lógico, para permitir que se evalúen de manera efectiva.

Una lista de chequeo (check list) o verificación, engloba una serie de preguntas, o

puntos de verificación en forma de cuestionario, en dónde se evalúa el grado de cumplimiento de las reglas o actividades establecidas con un fin determinado (Cardona y Restrepo, sf) .

El propósito de esta herramienta se centra en reducir las fallas que se pueden presentar al aplicar una actividad, verificando que se cumplan las condiciones de diseño.

2.8.2. Ayuda Visual

Una ayuda visual es otras de las herramientas utilizadas como parte de la estandarización y la mejora continua de procesos.

Un control visual es un estándar que se representa por medio de un elemento tipo gráfico o físico, de color o numérico, fácil de poder ver y comprender. Son indicadores que comunican información importante, de manera visual, de tal forma que las acciones se encuentren predeterminadas y controladas.

A nivel industrial se utilizan en plantas, oficinas y lugares de trabajo en general, que sean visibles, facilitando la toma de decisiones y acciones correctivas.

2.9. Correlaciones matemáticas

Se define correlación como una medida de la relación (covariación) entre dos variables cuantitativas continuas (x,y) , siendo x la variable independiente (algunas veces controlada) y y la variable dependiente o de interés. La manera más sencilla de conocer si dos variables se encuentran relacionadas es determinar si co-varían, es decir, si varían conjuntamente.

Una correlación positiva indica que ambas variables varían en el mismo sentido, mientras que una negativa significa que varían en sentidos opuestos. El índice de correlación se denota con la letra r (Vinuesa, 2016).

2.9.1. Correlación lineal y no lineal

Cuando se evalúa una relación entre variables, es importante determinar como se relacionan estas variables. Las relaciones lineales son comunes, pero también se pueden presentar casos en donde el comportamiento de los datos es no lineal o monótono. Lo primero que se debe de hacer para evaluar la tendencia de los datos es crear una gráfica de dispersión simple, y así poder evaluar la situación.

Una relación lineal es una tendencia de los datos que se puede modelar mediante una línea recta. Cuando ambas variables aumentan o disminuyen de manera simultánea a un ritmo constante, existe una relación lineal positiva. Por otro lado, cuando una variable aumenta mientras la otra disminuye existe una relación lineal negativa (Vinuesa, 2016).

Si una relación entre dos variables no es lineal, la tasa de aumento o descenso puede cambiar a medida que una variable cambia, causando un *patrón de curva* en los datos. Esta tendencia en forma de curva se puede modelar mejor mediante una función no lineal, por ejemplo, de tipo cuadrática o cúbica, o se podría transformar para convertirla en lineal.

2.9.2. Modelo predictivo o de regresión

La representación de la relación entre dos o más variables se puede suponer a través de un modelo formal, una expresión matemática que resuma como es la relación entre las variables. De esta manera se pueden realizar predicciones de los valores que puede tomar una de las dos variables (variable respuesta, dependiente o y) a partir de los valores de la otra variable (variable explicativa, independiente o x) (Carrasquilla *et al.*, 2016).

El modelo de regresión lineal simple es el más utilizado, en donde una de las variables es considerada como la variable predictora x , y la otra correspondiente a la variable

respuesta y . Lo anterior se puede ejemplificar mediante la siguiente ecuación, que representa el caso típico de una regresión lineal simple:

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad (9)$$

γ	Variable respuesta, adim.
β_0	Intersección, adim.
β_1	Pendiente, adim.
X	Variable predictoria, adim.

2.9.3. Análisis multivariable

El análisis multivariado en principio tiene como objetivo el estudio de varias variables de manera simultánea. Es decir, si se toma un objeto, no solamente se evalúa un aspecto suyo, sino que se consideran varios aspectos, tratando de determinar la relación entre estos (Campos, 2020).

Usualmente el análisis multivariable parte del uso de matrices. En general, se toman varias variables aleatorias o mediciones que ocupan una serie de columnas, y estas mediciones son consideradas sobre una serie de objetos o individuos. En donde se estudian bajo el concepto principal de vector. De esta manera cuando se mide una variable en un conjunto de elementos de una población, esta muestra puede representarse geoméricamente asociando el valor de la variable en cada elemento a una dimensión del espacio.

Un vector de dimensión n puede verse como una representación de los valores de una variable en n elementos de una población.

Y a su vez, una matriz es un conjunto de vectores. Cuando en lugar de medir una variable en cada elemento se observan los valores de k variables, entonces se puede

representar la muestra de datos multivariantes mediante una matriz.

Finalmente, se podría decir que si dos vectores representan los valores de dos variables estandarizadas (las dos variables tienen media cero y varianza unidad) en los mismos n elementos de una población, el producto escalar es equivalente al coeficiente de correlación entre las dos variables.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DEL BLOW POINT

En el presente Capítulo se presentará un estudio estadístico a partir de los datos históricos de la medición del Blow Point con el fin de seleccionar los hules que presenten mayor desviación estándar.

3.1. Introducción

Minimizar el tiempo de vulcanización es algo deseable en términos productivos, sin embargo, es necesario contemplar variables del proceso que pueden interferir en el curado de las llantas, por lo cual la empresa utiliza un factor de seguridad que toma en cuenta estas variaciones.

Dentro de las variables contempladas se encuentran 7, no obstante, la de interés en el presente trabajo corresponde a la variación asociada a una de las variables, llamada Blow Point.

Como se mencionó anteriormente, es importante contemplar estas variaciones para determinar el tiempo total que implica un ciclo de curado. Para obtener el dato del factor de seguridad es necesario realizar el cálculo del mismo mediante una sumatoria que incluye la variación de cada factor.

El interés de seleccionar el Blow Point como variable de estudio radica en que en dicha Compañía adicional al cálculo que se efectúa para el factor de seguridad, también se reporta un porcentaje de influencia de cada una de las variabilidades sobre el mismo, y para este caso el Blow Point es una de las de mayor impacto.

A continuación, en la Figura 3.1 se adjunta un gráfico representativo sobre el porcentaje de influencia que aporta cada variabilidad.

Es importante mencionar que los datos se encuentran codificados por políticas de privacidad de la empresa, y en todo momento del presente documento se trabajará de esta manera, sin embargo, en todos los casos que se requiera presentar información de esta índole se mantendrá la tendencia de los datos, con el fin de poder mostrar de manera más representativa la información.

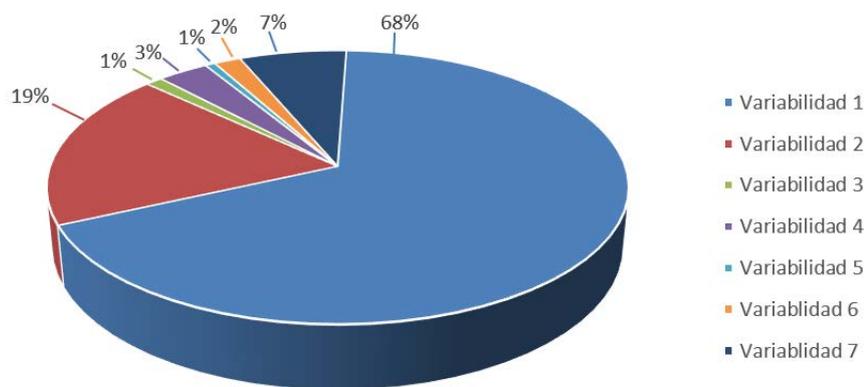


Figura 3.1. Gráfico porcentual de la influencia de cada variable sobre el cálculo del factor de seguridad para datos registrados en el período 2019-2020 en una prensa que utiliza agua como medio de transferencia de calor.

En el caso de la variabilidad del blow point esta corresponde a la nombrada como *variabilidad 2*, la cuál presenta un porcentaje del 19% de influencia de la totalidad, siendo esta la segunda de mayor peso.

Al ser una de las variabilidades de mayor impacto, las fluctuaciones de los datos en los cálculos no son deseadas, puesto que podrían afectar las condiciones de operación, y por ende la calidad del producto. En la Compañía se ha observado que los datos de Blow Point presentan una tendencia variable, lo que implica el deseo de llevar a cabo un análisis de factores que podrían estar repercutiendo en dicha situación.

3.2. Metodología

En esta sección se comenta de manera breve la metodología que se siguió para llevar a cabo el análisis sobre la variabilidad de los datos de Blow Point.

Inicialmente, se indagó sobre el Blow Point tanto a nivel teórico como práctico, para ello se consultaron los siguientes documentos: práctica estándar e instrucción de trabajo, adicionalmente se realizaron visitas a planta y al laboratorio, así como entrevistas a los ingenieros y técnicos involucrados, esto con el fin de comprender la metodología que se lleva a cabo para la ejecución de la prueba de Blow Point, así como la recolección de posibles factores que tengan influencia sobre el mismo a nivel de proceso. Todo lo descrito anteriormente permitió generar una idea global para la posterior investigación.

Una vez que se logró la comprensión para la obtención de los resultados del Blow Point se procedió a trabajar en el análisis de la de la variabilidad del mismo. Para ello inicialmente se consultaron los datos de registros históricos que maneja la empresa para la medición de Blow Point, por tipo de hule, con el fin de seleccionar aquellos que presenten mayor variación e impacto en el cálculo de la capacidad del proceso, consultando los datos de los años 2019 y 2020.

Para su análisis los datos fueron exportados al software minitab, en dónde se obtuvo el valor de desviación estándar en cada caso y adicionalmente se les realizó un análisis de normalidad. Con en el análisis de los resultados obtenidos se procedió a tomar en conjunto con los ingenieros a cargo del proyecto la decisión de trabajar con los 5 hules de mayor impacto en el cálculo del factor de seguridad.

3.3. Análisis histórico sobre la variabilidad de los datos del Blow Point

Como se comentó anteriormente, se ha detectado que los datos para esta variable no presentan una tendendencia constante. Es por esto que este capítulo se enfoca en evidenciar tal situación.

El primer paso a seguir fue obtener el valor de desviación estándar por tipo de hule. Una vez que los datos fueron analizados se determinó que de acuerdo al estadístico p-value los hules que son significativos por año corresponden a los que se muestran en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Datos de los hules con mayor desviación estándar para los años 2019 y 2020

Hule	Año 2019 Desviación estándar, $\sigma/(adim)$	Año 2020
H7	-	0.0544
H8	0.0530	-
H10	0.0605	0.0510
H23	0.0618	-
H26	0.0513	-
H29	0.0656	-
H33	-	0.0659
H35	0.0875	0.0659

Nota: Los datos fueron codificados a través de un factor numérico por términos de confidencialidad.

A partir de los datos, se puede observar que el comportamiento de la desviación estándar por año es variable, los hules no son los mismos en ambos años, a excepción del H10 y H35 que presentan los valores de desviación superior al valor estadístico p-value = 0.05, tanto para el 2019 como para el 2020.

Una vez que se efectuó dicho análisis se presentaron los resultados a los ingenieros a cargo del proyecto con el fin de en conjunto seleccionar los hules de mayor impacto para los resultados deseados por la empresa. Posterior al análisis en conjunto se tomaron en cuenta otros criterios de selección para los hules, ya que el enfoque directo del proyecto gira en torno al impacto que tiene esta variación en el cálculo del factor de seguridad y no todos los hules utilizados en producción presentan un impacto directo en el cálculo de dicho factor.

La explicación a esto reside en que para dicho cálculo únicamente se contemplan hules ubicado en partes críticas del neumático, partes señaladas en la Figura 3.2

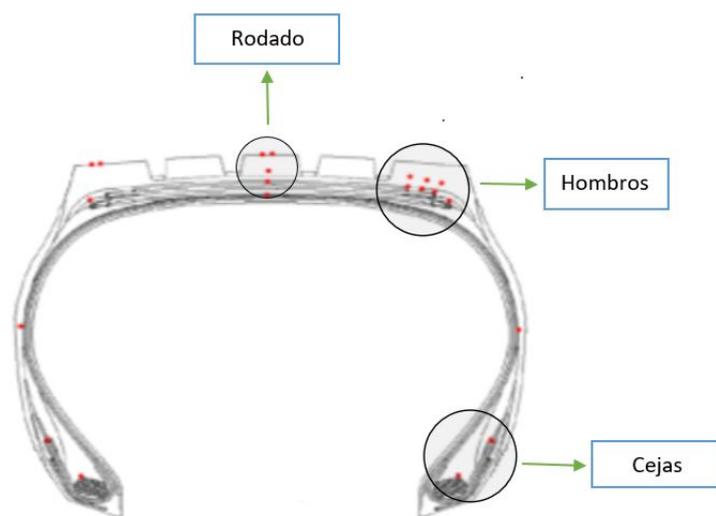


Figura 3.2. Perfil de un neumático(Adaptado de Faulk,2017).

En la Figura 3.2 se observa el perfil de una llanta, el cuál corresponde a una sección de la misma. Como se comentó en el Capítulo 1 en el apartado de *Prueba de Poro* estas secciones señaladas corresponden a puntos críticos de la llanta. Dichos puntos son monitoreados en esta prueba debido a que usualmente es en estas ubicaciones donde suele aparecer porosidad como consecuencia del proceso de tranferencia de calor, dicho de otra manera, al ser secciones con mayor grosor la tranferencia es más pobre. Es por esta razón, que se debe de tener seguridad que el tiempo de cura sea suficiente para que se lleve a cabo la reacción de vulcanización de manera satisfactoria en todas las partes de la llanta.

De esta manera tomando en cuenta lo anterior se seleccionaron para el presente trabajo los hules que se utilizan en las zonas de mayor grosor de la llanta, siendo estas zonas: rodado, hombros y cejas. Que corresponden a puntos críticos y por ende son los contemplados para el cálculo del factor de seguridad. En el Cuadro A.1 de la sección de Apéndices, se encuentra la lista de dichos hules, así como los valores de desviación estándar de los años 2018, 2019 y 2020 para cada uno de ellos, y su respectivo valor de capacidad del proceso.

Por otra parte, la capacidad del proceso corresponde a la multiplicación de la des-

viación estándar obtenida del Blow Point por el mejor tiempo de curado, conocido como BCT, siendo el resultado de esta multiplicación el valor utilizado en el cálculo del factor de seguridad. En el Capítulo 1 , apartado *Determinación de la variabilidad del blow point* se habla sobre la terminología BCT (mejor tiempo de curado), es importante aclarar que el BCT depende del tipo de hule y corresponde a una constante determinado por la Corporación.

De acuerdo al análisis de los datos presentado anteriormente, se seleccionaron los siguientes hules: H6, H7, H16, H23 y H33, lo anterior tomando en cuenta cual hule por año representa la mayor desviación estándar y el mayor valor de capacidad del proceso. En la Figura 3.3 se muestran los datos, tanto de la desviación estándar (σ) como de la capacidad del proceso ($\sigma \times \text{BCT}$) para los hules seleccionados.

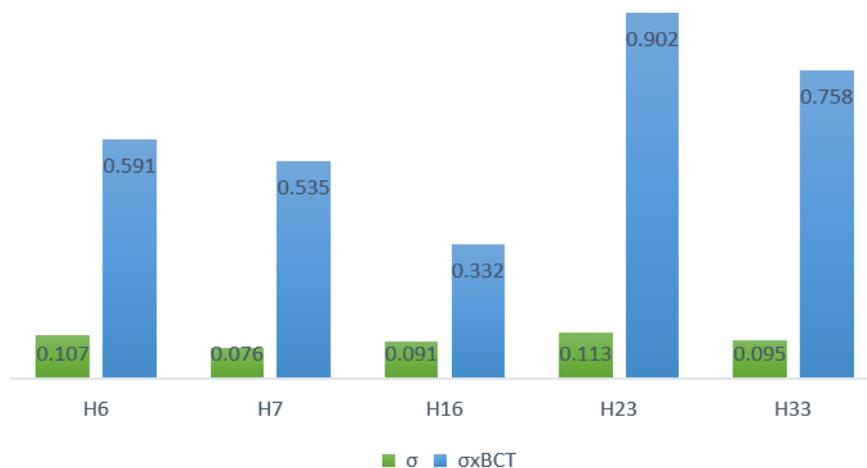


Figura 3.3. Valor de desviación estándar(σ) y de capacidad del proceso ($\sigma \times \text{BCT}$) para los hules seleccionados.

Una vez obtenidos los datos con mayor valor de capacidad del proceso y de desviación estándar se procede a trabajar en la obtención del dato para el factor de seguridad. El cálculo del factor de seguridad se realiza de manera anual, tal y como se observa en la ecuación 10:

$$\theta = \frac{\lambda}{\tau} \quad (10)$$

Por otra parte, a partir de los datos de los datos de la desviación estándar y del BCT por sus siglas en inglés se puede obtener el dato de la capacidad del proceso a través de la ecuación 11:

$$\psi = (\sigma_H * BCT) \quad (11)$$

Dónde:

- ψ Capacidad del proceso, adim
- σ_H Variación por tipo de hule, adim
- BCT Mejor tiempo de curado, adim.

Una vez obtenidos los valores de capacidad de proceso por tipo de hule, se selecciona aquel hule que presente un mayor valor. Es importante considerar que aquellos hules que presenten mayor desviación estándar no necesariamente son los que van a presentar un mayor valor de capacidad del proceso, debido a que se debe de considerar el factor multiplicativo del BCT en la fórmula, el cual es específico para cada hule, siendo esta una constante definida por la Corporación.

Volviendo al análisis de datos representados en la Figura 3.3 se puede observar que el hule H23, no solo presenta el mayor valor de desviación de todos los datos (0.113 adim) , sino que también presenta el mayor valor del cálculo de la capacidad del proceso (0.902 adim), por lo tanto, en este caso si ocurre que el hule con mayor variación también es el más impactante para la capacidad del proceso de los años seleccionados para el estudio.

Dado lo anterior y que adicionalmente el H23, corresponde a uno de los hules de mayor producción, se decidió en conjunto con los ingenieros seleccionarlo como el

caso base para la representación de los datos del presente trabajo, de esta manera si se logran oportunidades de mejora en la variación de los datos de blow point para este hule, es posible que también se logre un impacto en la variación de los demás hules de interés para la empresa.

3.4. Estudio de normalidad en los hules que presentan mayor variabilidad

Una vez seleccionados los hules se procedió a realizar el análisis de normalidad para cada caso.

Una prueba de normalidad permite determinar si la población de la cual se obtuvo la muestra sigue una distribución normal, identificación que resulta clave para la aplicación del procedimiento estadístico adecuado, y su respectivo análisis de datos.

El estudio de normalidad fue realizado mediante la aplicación de la prueba de Anderson-Darling en el software de Minitab. Es recomendable su utilización cuando se analizan distribuciones simétricas y tamaños de muestra pequeños ($n=30$), y en este caso no todos los hules seleccionados superan los 30 datos. De acuerdo a lo expuesto en la literatura esta prueba se basa en la diferencia de cuadrados entre las distribuciones pero, en su caso, otorga una mayor relevancia a los datos existentes en las colas de distribución (Farrel y Rogers-Stewart, 2006). Así diferentes autores han señalado esta prueba como la más potente estadísticamente cuando se alude a pruebas basadas en funciones de distribución empíricas (Arshad *et al.*, 2003).

Por estas razones es que se seleccionó esta prueba en lugar de otras como Ryan Joiner, Shapiro-Wilk o Kolmogorov-Smirnov.

En el caso del estadístico de Anderson- Darling se utilizan las siguientes pruebas de hipótesis, con el fin de determinar si los datos cumplen el supuesto de normalidad:

- H_0 : Los datos siguen una distribución normal.
- H_1 : Los datos no siguen una distribución normal.

El análisis de los datos se ejecutó haciendo uso del software Minitab. Del análisis se tomó el estadístico p (p-value) por tipo de hule, y a partir de los resultados obtenidos se observa que en todos los casos el valor p es mayor a α (0.05), por lo tanto, se concluye que no existe suficiente evidencia estadística para concluir que los datos no siguen una distribución normal, por ende, no se puede rechazar la hipótesis nula (H_0). Lo anterior se puede evidenciar en el Cuadro 3.2 que se muestra a continuación.

Cuadro 3.2. Valor de p obtenido por tipo de hule a partir del análisis de normalidad realizado en el software Minitab.

Tipo de hule	Valor p,(adim)
H6	0.084
H7	0.337
H16	0.488
H23	0.454
H33	0.326

Nota: Los datos fueron codificados a través de un factor numérico por términos de confidencialidad.

Por otra parte, a partir de este mismo software se trabajó en la obtención de los gráficos de probabilidad para cada caso, en la Figura 3.4 se evidencia lo ocurrido en el análisis de datos para el H23, el cual corresponde al hule seleccionado como caso base de estudio mencionado en párrafos anteriores.

Como se puede observar de acuerdo al valor p obtenido de 0.454 los datos presentan una distribución normal. Adicionalmente con base en la interpretación del gráfico se visualiza el ajuste de distribución normal que presentan los datos, los puntos se encuentran próximos a la línea de distribución ajustada (línea central). Si la distribución teórica especificada corresponde a un buen ajuste, los puntos se situarán estrechamente a lo largo de la línea recta, tal y como ocurre en este caso en donde la distribución normal parece ajustarse adecuadamente a los datos.

Cabe resaltar que la línea de distribución ajustada es la línea recta intermedia de la gráfica, mientras que las líneas continuas externas son los intervalos de confianza de los percentiles individuales, no de la distribución como un todo, por lo tanto, no

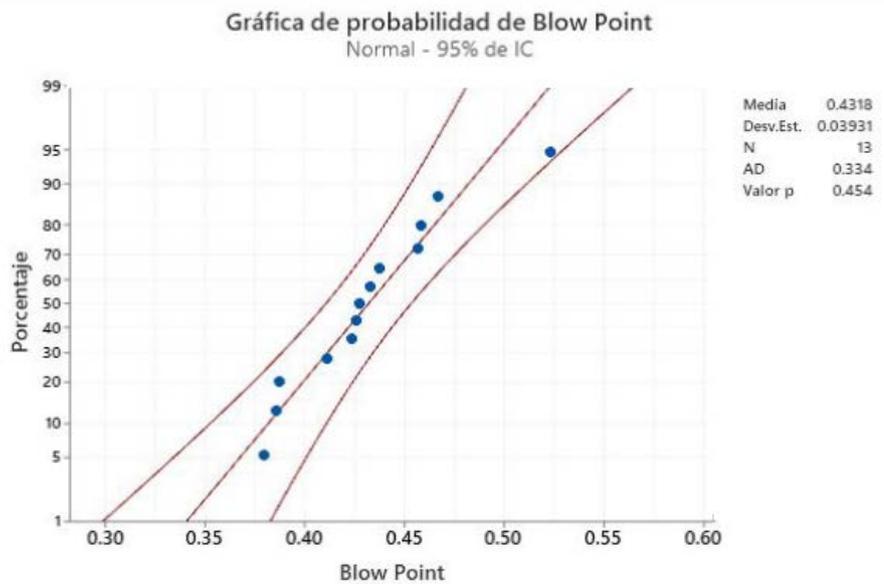


Figura 3.4. Gráfico de Normalidad de Blow Point para el hule H23.

son utilizadas como parte de la evaluación del ajuste de distribución.

Por último, es importante mencionar que para el análisis gráfico de probabilidad de los otros 4 hules se obtuvo el mismo resultado. En su mayoría los puntos se encuentran próximos a la línea de distribución ajustada, y por lo tanto, la distribución normal también parece ajustarse a los datos en cada caso. Los gráficos respectivos se encuentran en la sección de Apéndices.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DEL ENSAYO DEL BLOW POINT

En el presente Capítulo se presenta la información de las fuentes de variación asociadas al método de medición que podrían repercutir en la variabilidad del Blow Point, así como la incertidumbre asociada al ensayo para evaluar su impacto en el valor obtenido de la medición del Blow Point. Finalmente, se presentan los resultados de un análisis de repetibilidad y reproducibilidad con el fin de evaluar la variabilidad del ensayo de medición.

4.1. Introducción

El ensayo del Blow Point es utilizado para cuantificar el efecto de curado mínimo necesario para llevar a cabo la vulcanización de los hules. Es un ensayo de gran relevancia dado que los resultados obtenidos a partir del mismo tienen un impacto significativo en el cálculo del factor de seguridad.

Dicha prueba es ejecutada en el Laboratorio de Calidad de la empresa. Para su metodología se llevan a cabo varias etapas: recolección del material, preparación de la muestra, fijación de parámetros en el equipo de vulcanizado, vulcanización de las muestras y por último análisis de las muestras.

La mayoría de estos pasos se ejecutan de manera manual, únicamente la vulcanización se encuentra automatizada. Es por esta razón que es de importancia una adecuada capacitación del personal técnico del laboratorio, por ello la empresa cuenta con una práctica estándar y una instrucción de trabajo que dictan los pasos a seguir para ejecutar la prueba.

El ensayo del Blow Point se lleva a cabo de manera mensual, exceptuando los hules nombrados como críticos por el Departamento de Ingeniería de Procesos, para estos hules se efectúan mediciones quincenales, con el fin de tener mayor cantidad de datos

y generar un mejor monitoreo de su comportamiento.

Los datos obtenidos de la medición son reportados al ingeniero encargado de calcular el factor de seguridad. En caso de que algún hule no se encuentre de acuerdo a las especificaciones de calidad establecidas para la prueba, se indica una no conformidad, y es necesario repetir la prueba.

Como ya se comentó, los resultados obtenidos como producto de la medición son variables, a nivel operativo esto representa una problemática, ya que en todo proceso se desea mantener un comportamiento constante y predescible sobre las variables cuantificadas, esto con el fin de asegurar la estabilidad del proceso y la calidad del producto. Razón por la cual, es de interés para la empresa en estudio, realizar una evaluación sobre dicho ensayo, con el fin de identificar posibles variables asociadas a las fluctuaciones de los resultados obtenidos. En la Figura 4.1 se ejemplifica el caso para hule seleccionado (H23) con mayor variabilidad, que como se comentó en párrafos anteriores será el utilizado como caso base para la representación de los resultados.

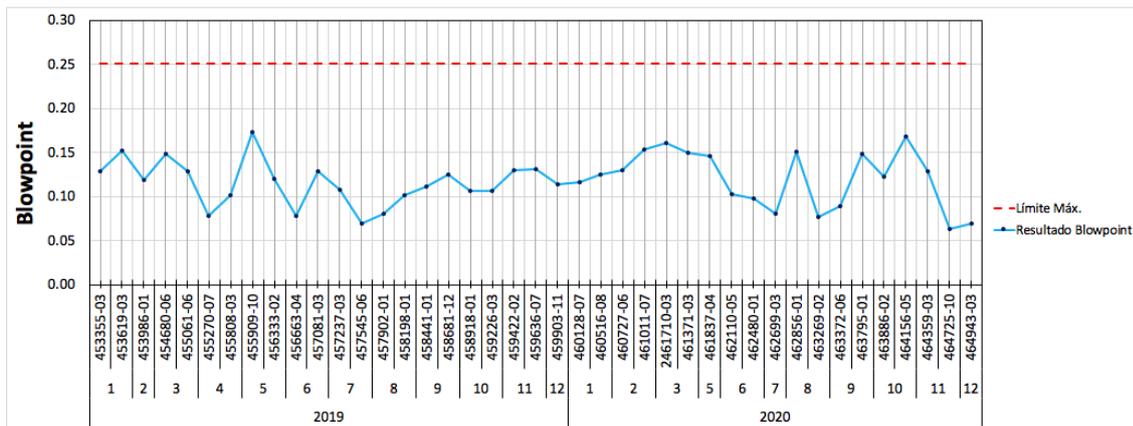


Figura 4.1. Gráfico de control para el hule H23 en el período 2019-2020.

Como se puede observar en esta Figura los datos se encuentran bajo control debido a que no superan el valor del límite superior de control (0.25 adim), sin embargo, existe una alta fluctuación de los datos que no es deseada en el proceso, esto debido a que aporta variabilidad al cálculo del Blow Point, y por ende al factor de seguridad.

4.2. Metodología

En ensayo del Blow Point tiene impacto sobre el cálculo del factor de seguridad, razón por la cual en esta sección se comenta de manera breve la metodología que se siguió para llevar a cabo el análisis sobre el método de medición y los factores asociados a su variación.

El primer paso consistió en ejecutar pruebas con distintos tipos de hule a manera de entrenamiento, para ello se siguieron las instrucciones planteadas en la práctica estándar (documento utilizado por la empresa que contiene métodos y requisitos estandarizados) y los conocimientos obtenidos de las visitas previas al laboratorio. Estas pruebas fueron supervisadas por el supervisor a cargo del laboratorio.

A partir de las pruebas realizadas se logró obtener una mejor comprensión del método, su funcionamiento y los resultados obtenidos.

Con el conocimiento adquirido de la ejecución de la prueba, la documentación indagada y las entrevistas realizadas se procedió a puntualizar en una lista los posibles factores de variación asociados al ensayo.

El siguiente paso consistió en la elaboración de una lista de verificación, la cual fue creada a partir de la información contemplada en la instrucción de trabajo (dicha instrucción de trabajo es específica para el método de medición, corresponde a un extracto en español de las instrucciones planteadas en la práctica estándar), así como del conocimiento adquirido hasta el momento. Esta lista se creó con el objetivo de corroborar si el ensayo del Blow Point se encontraba estandarizado.

Seguidamente, con los factores seleccionados como fuente de variación se elaboró un diagrama de Ishikawa, y tomando como base dicho diagrama se realizó el cálculo de la incertidumbre asociada al método, con el fin de evaluar el impacto generado por el método en la variación reportada del Blow Point.

Finalmente, para determinar la precisión asociada al ensayo del blow point se realizó un análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R), y para evaluar la exactitud del sistema se realizó un estudio de sesgo y linealidad.

4.3. Metodología utilizada para la ejecución de la prueba

En el presente apartado se va a detallar sobre la prueba del Blow Point, pasos a seguir para su ejecución, instrumentos utilizados y los datos arrojados por la misma.

4.3.1. Recolección de los hules

El primer paso a seguir corresponde a la recolección de los hules. Para esto se lleva a cabo un recorrido en planta, donde el técnico de laboratorio se encarga de muestrear los hules aprobados previamente para su uso en producción, anotando en cada caso su trazabilidad y fecha de producción. Al finalizar el recorrido el material es llevado al laboratorio para su posterior análisis.

Este recorrido se realiza de manera mensual, y en el caso de los hules críticos también se lleva a cabo de forma quincenal.

4.3.2. Preparación de la muestra

Se debe de molinear la muestra del componente hasta formar una banda lisa de hule. Para ello se debe de ajustar el nivel de apertura de los rodillos del molino representado en la Figura 4.2, dando lugar a las dimensiones deseadas del material (grosor).



Figura 4.2. Molino utilizado para la preparación de la banda lisa de hule.

El nivel de apertura dependerá del tipo de componente con el que se esté trabajando, ya que no todos los hules presentan el mismo comportamiento al ser molineados, por factores como la viscosidad del material, en la Figura 4.3 se observa un ejemplo de un hule trabajado con el molino.



Figura 4.3. Lámina de hule posterior al proceso de molineado.

Una vez molineado el hule se procede a recortar una muestra Figura 4.4, haciendo uso de un molde que cuenta con las dimensiones necesarias para la ejecución de la prueba. Esta muestra es pesada, a fin de verificar que se cumpla con la estandarización del ensayo, si al pesar esta muestra el peso no se encuentra dentro del valor estipulado, entonces la muestra se debe de ajustar a fin de cumplir con el requerimiento que se establece en la práctica estándar.



Figura 4.4. Molde utilizado con la dimensiones de la muestra.

Adicionalmente, se debe verificar que la muestra preparada no cuente con burbujas de aire atrapado Figura 4.5, en caso de que esto ocurra se debe de utilizar un punzón para eliminarlas antes de pasar a la siguiente etapa (ejecución de la prueba).



Figura 4.5. Eliminación de burbujas en la muestra recortada, según dimensiones establecidas.

4.3.3. Analizador de Blow Point

La prueba de Blow Point es ejecutada haciendo uso de un dispositivo conocido como "Blow Point Analyzer". Este dispositivo es utilizado con el fin de cuantificar el grado mínimo de vulcanización requerido para la formación de poro en el hule.

El equipo cuenta con un par de moldes de tipo cuña , incluye una unidad de sensores,

una unidad principal de presión y una para el control del curado. Para llevar a cabo este control se utiliza un software asociado al sistema por medio del cual se controlan los parámetros de ejecución de la prueba. En la Figura 4.6 se encuentra una imagen alusiva al mismo.



Figura 4.6. Equipo de medición del Blow Point.

El principio de funcionamiento consiste en la transferencia de calor a través del fenómeno de conductividad, el cual es monitoreado mediante sensores que son insertados en la muestra. La prueba inicia una vez que los moldes utilizados como el medio de transferencia de calor se ponen en contacto directo con el material de prueba, generando a su vez un incremento de presión en el proceso. A partir de este momento los curados equivalentes comienzan a aumentar conforme aumenta el gradiente de temperatura en la muestra, estos cambios de temperatura son cuantificados por medio de termopares que permiten asociar cada valor con un dato de curado equivalente para cada termopar. Una vez que el tercer termopar alcanza el valor de CE que se ingresó de manera manual al software (punto de ajuste) la ejecución de la prueba se detiene, y con ello la transferencia de calor, así como una caída de presión ocasionada por la separación de los moldes de la muestra.

El equipo almacena el registro de datos asociados a la medición, y una vez que se lleva a cabo la etapa de análisis de la muestra como se comentará más adelante es posible realizar el cálculo del Blow Point a partir de los datos almacenados.

4.3.4. Ejecución de la prueba

El primer paso a seguir para la ejecución de la prueba consiste en la preparación del equipo. Inicialmente se deben de precalentar las placas del módulo de tal modo que se alcance la temperatura establecida en la práctica estándar. Una vez alcanzada dicha temperatura, se coloca la muestra del compuesto previamente preparado sobre el molde (placas) y se inicia la medición. El equipo cuenta con 4 termopares como se muestra en la Figura 4.7 que perforan la muestra encargados de cuantificar los valores de temperatura a lo largo del área de transferencia del material.

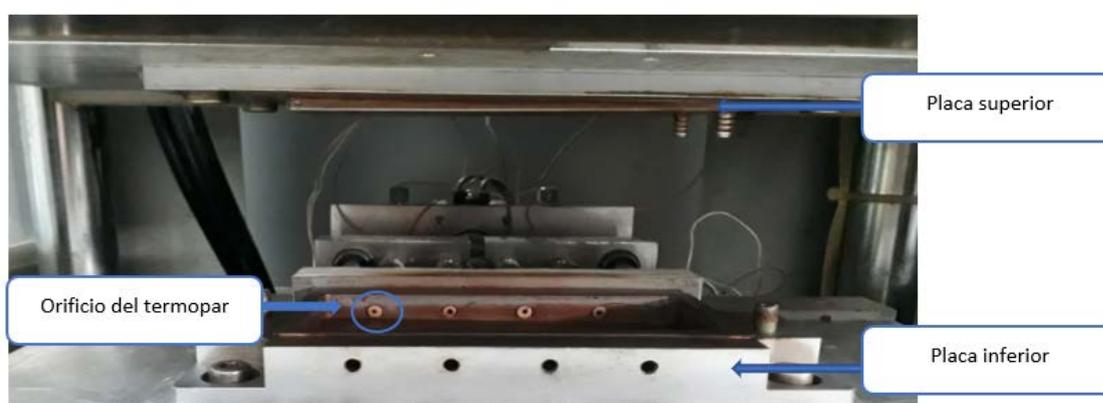


Figura 4.7. Molde del blow point y localización de los termopares.

Al entrar en contacto la muestra con las placas se genera una transferencia de calor conductivo, y es justamente este gradiente de temperatura al que se ve sometido el material cuantificado mediante los sensores de temperatura (termopares). El módulo toma los valores de temperatura en cada posición del termopar y los convierte mediante un arreglo matemático a datos de curado equivalente (CE), esto permite conocer el comportamiento del material en términos de avance de reacción de vulcanización, ya que la medición se encuentra en función del tiempo. La medición finaliza una vez que el tercer termopar alcanza el ajuste establecido, este consiste en un valor de CE específico para cada compuesto. Al alcanzar este valor la medición se detiene y automáticamente el equipo abre las compuertas para poder así retirar la muestra.

4.3.5. Análisis de la muestra

Posteriormente, se toma la muestra vulcanizada con uso de guantes y se coloca en una estufa que cuenta con un set point de temperatura, por un periodo de tiempo establecido, esto a fin de asegurar el curado del hule, y permitir la obtención de una lectura clara del poro. Transcurrido el tiempo la muestra es retirada, se le recortan los excedentes de hule de manera manual e inmediatamente se procede a realizar el corte establecido en la práctica estándar, haciendo uso de una guillotina como la que se muestra en la Figura 4.8 la cual cuenta con guías para la realización de este paso.



Figura 4.8. Guillotina y cuchilla con líneas guías, utilizada para el corte de la muestra.

Este corte permitirá llevar a cabo la lectura del inicio de porosidad en la muestra, la manera de cuantificar este dato es mediante una regla certificada, tomando la distancia al punto de inicio del poro a partir del extremo delgado de la muestra. A continuación, se muestra en la Figura 4.9 un ejemplo de hule con porosidad.

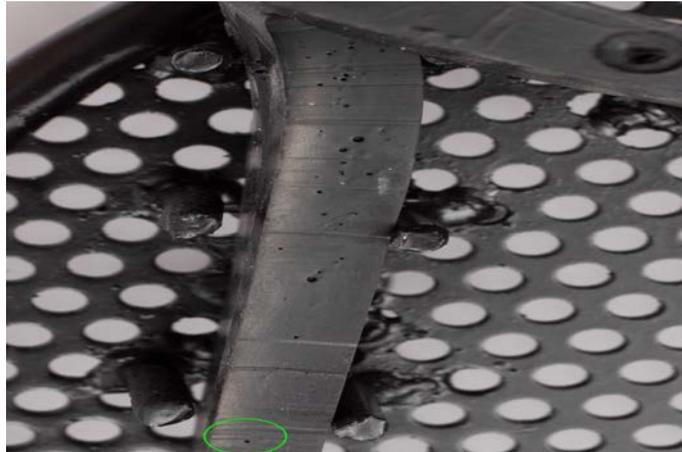


Figura 4.9. Muestra de hule con porosidad.

Ahora bien, para determinar si lo observado corresponde realmente a un poro se deben de seguir una serie de criterios estipulados en el procedimiento para la ejecución de la prueba. Una vez, que se verifica el cumplimiento de estos criterios se decide cuál es el valor de distancia en donde aparece el primer poro, este dato se anota. A partir, del resultado arrojado de distancia para la muestra este es ingresado al software del sistema del Blow Point Analyzer, el cual se encarga de ejecutar un cálculo del valor del Blow Point mediante una forma matemática que se encuentra programada en este. Para dicho cálculo es necesario realizar el análisis de Blow Point y el método de ejecución por duplicado, es decir, para un total de dos muestras por compuesto, con lo cual se obtiene un valor promedio de Blow Point reportado como el dato de la medición para cada compuesto (tipo de hule) analizado.

4.4. Factores de variabilidad asociados al ensayo del Blow Point

Como se comentó la sección 4.1 los ingenieros a cargo del proyecto han observado que el comportamiento de los datos obtenidos de las mediciones es variable. Es por esto que es de especial interés determinar si existen fuentes de variación asociadas a dicho comportamiento, puesto que se pretende asegurar las condiciones operativas

de tal manera que se mantenga una estabilidad de los datos en los diferentes lotes de producción.

En la Figura 4.10 se muestra un diagrama de Ishikawa con la lista preliminar de factores que fueron recopilados como parte de la investigación realizada, estos surgen de la lectura de los documentos referentes al ensayo, consultas a los ingenieros a cargo y al supervisor del laboratorio, y adicionalmente como parte del aprendizaje que se obtuvo de la ejecución del ensayo y de la observación respectiva. Estos fueron agrupados en 4 variables: material, método, máquina y hombre.

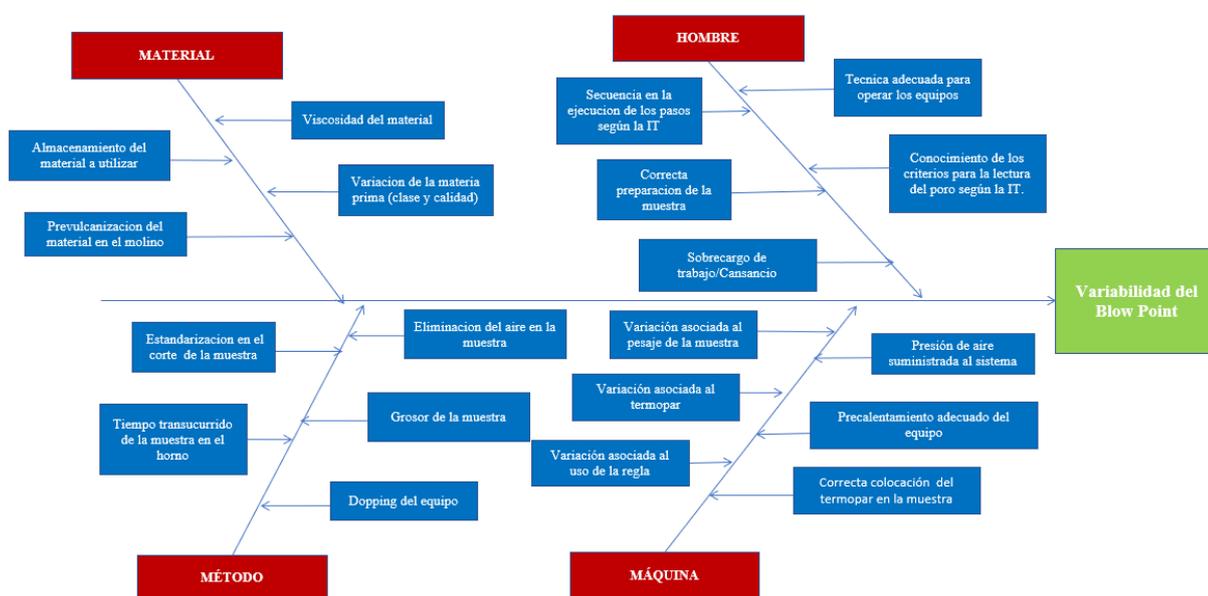


Figura 4.10. Diagrama de Ishikawa con la lista preliminar de factores de variación asociados al método de medición del blow point.

Para determinar cuales de estos factores estarían generando un impacto sobre la variación, se realizó un análisis sobre cada categoría (material, método, máquina y hombre).

4.4.1. Material

En el caso del material se tienen las siguientes posibles fuentes de variación:

- Almacenamiento del material: en este caso la Corporación cuenta con pautas estipuladas para el almacenamiento del mismo, las cuales aseguran que no se vea afectado por condiciones del entorno repercutiendo en la calidad del material producido.
- Prevulcanización del material en el molino: este factor se contempló debido a que el hule es molineado como parte de la ejecución del ensayo formando una banda lisa, este se encuentra en contacto directo con el molino de manera que podría generar una prevulcanización en el material, ocasionando variaciones en el posterior tratamiento de vulcanización que se lleva a cabo en el analizador de Blow Point. Sin embargo, el molino cuenta con un sistema de enfriamiento como parte de las pautas corporativas para evitar tal situación, por lo que la transferencia de calor al hule no debería de impactar en el posterior tratamiento del mismo.
- Variación de la materia prima: la materia prima es examinada en el laboratorio previo al inicio de la primer etapa del proceso productivo para asegurar que cumpla los requerimientos en los parámetros de control de calidad a nivel corporativo, una vez que se verifica este cumplimiento la materia prima es liberada y se inicia la cadena de producción, por lo que la variación de la misma ya se encuentra contemplada como parte del proceso productivo.
- Viscosidad del material: por otra parte, la viscosidad corresponde a un punto de suma importancia para lograr las condiciones deseadas del hule en el proceso, es por esto que la empresa cuenta con una prueba de reometría de la cual se comentará más adelante. Esta prueba permite controlar que el hule cumpla con las especificaciones de viscosidad requeridas para su implementación en el proceso, en caso de no cumplir el material es retenido. Es importante aclarar que dicha prueba se realiza primero que el ensayo del blow point, es decir, si no pasa el control de la viscosidad no se podrá realizar la prueba de blow point.

Estos 4 puntos mencionados anteriormente fueron verificados de manera que se determinara que existía el cumplimiento de los mismos de acuerdo a lo estipulado por

la empresa, y no estuvieran introduciendo variación a la ejecución de la prueba, y por ende, a los datos obtenidos del Blow Point.

4.4.2. Máquina

En el caso de máquina se tienen las siguientes posibles fuentes de variación, que podrían afectar el funcionamiento del equipo y por ende los resultados obtenidos del método de medición:

- Variación asociado al termopar: el instrumento de medición se encuentra bajo control metrológico, por lo tanto, no se contempla como fuente de variación.
- Variación asociada al uso de la regla: este instrumento se encuentra bajo control metrológico, esto implica que no sea contemplada como fuente de variación.
- Variación asociada al pesaje de la muestra: la balanza también se encuentra bajo control metrológico. Al igual que en los casos anteriores no se contemplará como fuente de variación.
- Presión de aire suministrada al sistema: la práctica estándar establece la presión de aire que debe de ser suministrada al sistema para su funcionamiento adecuado, es por esto que se verificó con los encargados de mantenimiento que esta condición se estuviera cumpliendo. Se corroboró que efectivamente cuenta con la presión indicada por lo que se descartó como fuente de variación del análisis realizado.
- Pre calentamiento adecuado del equipo: de acuerdo a lo estipulado por la práctica estándar el equipo debe de tener un pre calentamiento en un tiempo establecido, una vez que este tiempo se alcance se llega a la temperatura de referencia bajo la cual debe de operar el mismo. Nuevamente se le solicitó a los encargados de mantenimiento la verificación de la temperatura en las

placas a las cual se debe de llegar posterior al precalentamiento, este punto también se cumplió, por lo cual fue descartado como fuente de variación.

- Correcta colocación del termopar en la muestra: el procedimiento establece que se debe verificar que las termocuplas ingresen y salgan correctamente de la muestra. Se verificó que los termopares estuvieran en condiciones óptimas de operación, y adicionalmente también se les solicitó a los encargados de mantenimiento verificar si los termopares se encontraban calibrados. En este caso se corroboró el adecuado funcionamiento de los termopares por lo que se descartó como parte del análisis de fuentes de variación.

4.4.3. Método

En el caso de método para evaluar cuales factores podrían estar ocasionando variación debido a que no se cumplan o no sean contemplados como parte de la ejecución del mismo, se procedió a realizar una lista de verificación, ya que la empresa no contaba con una y es de utilidad para asegurar las condiciones de operación. En el apartado *Evaluación del ensayo del Blow Point* del presente Capítulo se comenta sobre esta.

- Estandarización del corte de la muestra: las dimensiones sobre el corte de la muestra sí se encuentran estandarizadas según los requerimientos de la práctica estándar. Para la ejecución del método se utiliza un molde, el cual fue verificado para corroborar si cumplía con las dimensiones establecidas.
- Tiempo transcurrido de la muestra en el horno: la práctica estándar sí especifica el tiempo que debe de transcurrir la muestra en el horno. Con la evaluación que se realizó de la lista de verificación se corroboró que los operarios tienen conocimiento sobre el tiempo que debe de transcurrir la muestra en el horno, y este punto sí es cumplido de acuerdo a lo establecido.
- Eliminación de aire en la muestra: la práctica estándar establece la eliminación de aire en la muestra, y de acuerdo a la lista de verificación este paso es

cumplido, sin embargo, se observó que se puede añadir un paso adicional a la instrucción de trabajo (IT) para evitar cualquier aporte de variación al método debido a este factor, por lo cual se contemplará como fuente de variación con una posible oportunidad de mejora.

- Grosor de la muestra: a partir del análisis realizado se demostró que aunque se verifica que el grosor de la muestra se encuentre dentro del rango de tolerancia establecido en la práctica estándar, el paso no se encuentra totalmente estandarizado, por lo cual se contemplará como fuente de variación con una posible oportunidad de mejora.
- Dopping del equipo: este punto se encuentra como parte de los requerimientos de la ejecución del método, sin embargo, no se especifica con claridad la periodicidad de su aplicación según lo establecido en la instrucción de trabajo (IT), es decir, no se encuentra totalmente estandarizado, por lo cual este factor también se contemplará como fuente de variación con una posible oportunidad de mejora.

4.4.4. Hombre

Por último para las fuentes de variación asociadas a hombre también fueron evaluadas las siguientes consideraciones haciendo uso de la lista de verificación:

- Secuencia en la ejecución de los pasos según la IT: de acuerdo a lo evaluado con la lista de verificación, los operarios sí ejecutan los pasos según el orden establecido en la práctica estándar.
- Conocimiento de los criterios para la lectura del poro: la evaluación realizada arrojó que aunque los operarios tienen conocimiento sobre los criterios establecidos en la práctica estándar, existe ambigüedad sobre los mismos, por lo cual este factor será otro de los contemplados como fuente de variación con una posible oportunidad de mejora.

- Sobrecargo de trabajo/cansancio: esta corresponde a una de las fuentes de variación que siempre debe de ser contemplada en un análisis de este tipo, sin embargo, en este caso se descarta como una de ellas ya que en el laboratorio donde se ejecutan estos análisis se encuentran distribuidas las cargas de trabajo entre los operarios, por lo que esto no debe de ser un factor determinante sobre los resultados obtenidos de dicha prueba.
- Técnica adecuada para operar los equipos: todo operario debe de recibir el entrenamiento previo a su primera ejecución del método, esto asegura que tenga conocimiento en la operación de los equipos. Adicionalmente con la lista de verificación aplicada se corroboró que los operarios si contaran con el conocimiento técnico de operación de los equipos, por lo que se descartó como fuente de variación.
- Correcta preparación de la muestra: Finalmente, para evaluar este punto se utilizó nuevamente la lista de verificación, corroborando que los operarios sí siguen los pasos establecidos en la práctica estándar en la sección de preparación de la muestra, por lo que se descartó como fuente de variación.

4.5. Evaluación del ensayo del Blow Point

Uno de los objetivos de la realización del proyecto contempla la evaluación sobre dicho ensayo, para ello se plantea la estandarización del mismo con lo que se pretende asegurar las condiciones bajo las cuales es ejecutado, de manera que los resultados arrojados entre cada medición no impacten de manera significativa la variación del blow point.

La estandarización de un ensayo o proceso consiste en proporcionar instrucciones precisas para la ejecución de tareas, documentando materiales, equipos utilizados, así como la secuencia de los pasos que se deben de llevar a cabo para la obtención de los resultados deseados. La estandarización puede dividirse en la estandarización de los materiales utilizados y la estandarización del trabajo. La primera hace referencia

a que todos los objetos deben de ser iguales, mientras que la segunda consiste en establecer un acuerdo acerca de la manera en que se lleva a cabo el procedimiento (Kondo, 1993).

En la estandarización de los procedimientos es importante verificar que todos los trabajadores actuales y futuros, utilicen la misma metodología, equipo y materiales para el método.

Es por esto que se propuso la creación de una lista de verificación como herramienta para evaluar la estandarización del ensayo. Inicialmente, la empresa no contaba con una herramienta de este tipo la cual es de gran utilidad tanto para la recopilación de formación de manera ordenada y sistemática sobre la ejecución actual que se tiene de la prueba, así como para asegurar la correcta aplicación del método evitando que se generen fuentes de variación.

Para su elaboración se procedió a revisar nuevamente la instrucción de trabajo (IT) sobre la ejecución de la prueba, de manera que permitiera extraer puntos de verificación importantes los cuales fueron anotados en dicha lista, adicionalmente se contemplaron ciertas instrucciones que no se encontraban previstas en la IT sino que surgieron como parte del conocimiento previo que se obtuvo de las entrevistas al supervisor, las observaciones realizadas, y la elaboración de factores preliminares como fuente de variación descritos en la sección 4.4. Estas instrucciones corresponden a puntos importantes a ser tomados en cuenta como una oportunidad de mejora. En la Figura 4.11 se muestra un extracto de la lista de verificación elaborada, el documento completo se adjunta en la sección de Apéndices.

4.6. Fuentes de variación contempladas en el análisis

A partir del análisis realizado sobre los factores preliminares de variación y de la aplicación de la lista de verificación se decidió reelaborar el diagrama de Ishikawa que reflejara finalmente los posibles factores influyentes en la ejecución del ensayo, antes explicadas y que se evidencian en la Figura 4.12 se evidencian.

Lista de Chequeo para la estandarización del método de medición del Blow Point				
Nombre del Proceso:		Nombre empleado:		Materia prima utilizada:
Intrucciones: Llene la casilla correspondiente a la clasificación al otorgar un "✓" según su criterio de aprobación para el ítem correspondiente. Nota: Los ítems que cuenten con un "*" corresponden a intrucciones que no se encuentran directamente explícitas en la práctica estándar (BL005) o en la instrucción de trabajo.				
Categoría	Clasificación			Observaciones
	Sí	No	N.A	
A. Preparación de la muestra				
La muestra es molineada hasta obtener una banda lisa.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
La muestra es molineada hasta obtener el grosor necesario de la banda lisa.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
El molino utilizado recibe mantenimiento.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se tiene conocimiento sobre el ajuste del grosor del molino con el que se debe de molinear la muestra.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se tiene conocimiento que el hule no debe de ser molineado superior a 5 veces (esto se ejecuta con el fin de ajustar el grosor y tamaño de la banda lisa que se está preparando).*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Toda la banda lisa presenta el mismo grosor.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se cuenta con un dimensionamiento estándar de las muestras (molde).*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 4.11. Lista de verificación elaborada como parte del proceso de estandarización de método de medición del Blow Point. *(Elaboración propia).*

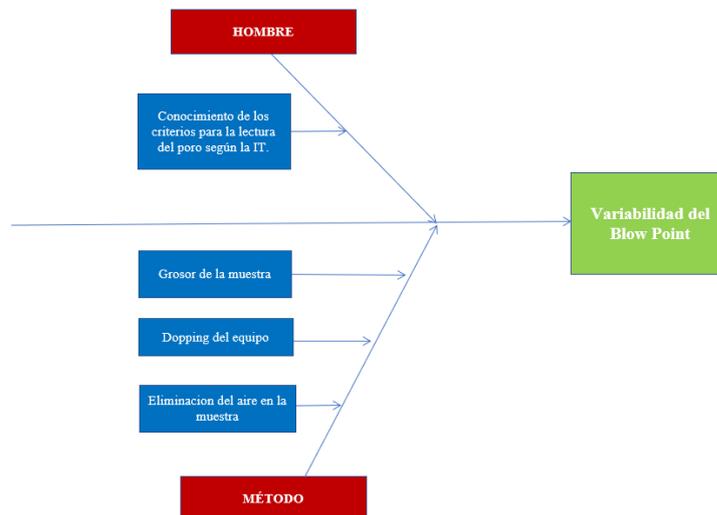


Figura 4.12. Diagrama de Ishikawa elaborado a partir del análisis del método de medición.

En el caso del factor evaluado en hombre que hace referencia al conocimiento de los criterios para la lectura del poro, se notó que existe ambigüedad sobre las instrucciones brindadas en la instrucción de trabajo, adicionalmente existe diferencia entre los criterios de lo que se cataloga como poro entre un operario y otro. Es por esta razón que se desea evaluar mediante un estudio de R&R la repetibilidad y la reproducibilidad del ensayo, con el fin de obtener información contundente sobre si este es un factor que aporta variación. En caso de que se corrobore que esto ocurre se implementará una oportunidad de mejora.

Y por otra parte, en el caso del método se detectaron una serie de factores asociados al mismo que podrían repercutir sobre la variación de los resultados. Por esta razón se contempló la estandarización de los mismos, de manera que no aporten variación al mismo, para ello se propondrán una serie de oportunidades de mejora las cuales se comentarán posteriormente en el Capítulo 6.

4.7. Determinación de la incertidumbre asociada al ensayo

Como parte del desarrollo de la práctica dirigida se determinó la incertidumbre asociada al ensayo de medición del Blow Point, esto siguiendo los pasos expuestos en la Figura 2.10 de acuerdo a lo expuesto en la guía *Evaluation Measurement Data* (Evaluación de la medición de los datos).

Inicialmente, se determinó el modelo matemático que relaciona el mesurando y las variables que lo afectan. A continuación, se muestra la ecuación correspondiente.

$$BP = -m * L + CE + rep \quad (12)$$

Dónde:

BP	Blow point, adim
m	Pendiente obtenida del modelo de regresión lineal, 1/m
L	Distancia del poro medida con la regla, m.
CE	Intercepto obtenido del modelo de regresión lineal, adim.
rep	Repetibilidad asociada a la medición, adim.

Seguidamente, se determinaron las fuentes de incertidumbre asociadas a la medición, las cuales se muestran en la siguiente Figura 4.13.

Para estimar la incertidumbre estándar se tomó en cuenta la variación asociada según las fuentes de incertidumbre mostradas en la figura anterior, donde se muestra que

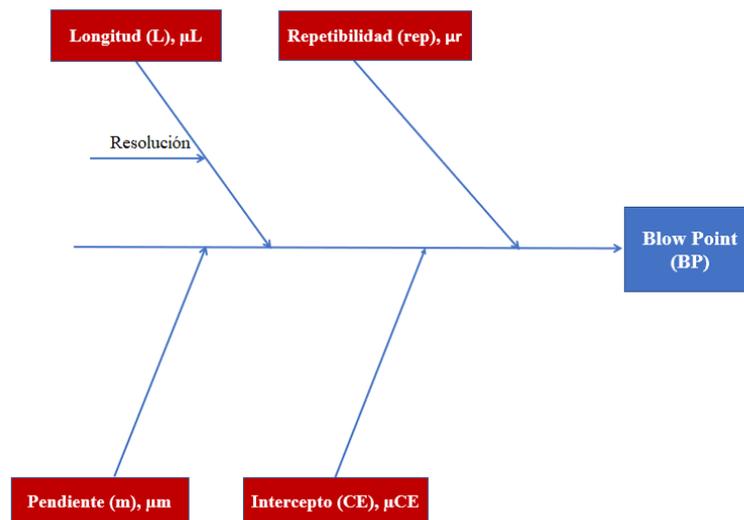


Figura 4.13. Diagrama de Ishikawa sobre la determinación de la incertidumbre asociada al método de medición.

las causas principales corresponden a las siguientes:

- La variación aportada por el instrumento de medición de longitud en la aparición del poro, que en este caso corresponde a la regla, la cual cuenta con un valor de resolución asociada de 0.05 cm según el certificado de calibración que se adjunta en la sección de Anexos.
- La variación asociada a la repetibilidad del ensayo, esta se contempla como fuente de variación ya que el ensayo se ejecuta por duplicado para cada muestra. Así mismo, por medio de la repetibilidad se analiza el aporte que el operario agrega a la incertidumbre como parte de la ejecución de dicho ensayo, dentro de estas variaciones se contempla el pesaje de la muestra.
- La variación de la pendiente y el intercepto, estas variaciones se toman como parte de la incertidumbre que aporta el equipo al efectuar el cálculo del Blow Point. La incertidumbre del intercepto se encuentra intrínsecamente relacionada a los termopares, ya que es por medio del CE (curado equivalente) que se monitorean los cambios de temperatura durante el proceso de vulcanización

de la muestra.

Es por esto que de acuerdo a lo discutido anteriormente el modelo matemático que representa la varianza total de la medición corresponde al siguiente:

$$\mu_C = \sqrt{\sum \delta BP / \delta X_i * \mu_i^2} = \sqrt{(1 * \mu_{rep})^2 + (1 * \mu_{CE})^2 + (m * \mu_L)^2 + (L * \mu_m)^2} \quad (13)$$

Dónde:

δBP	Derivada con respecto al blow point, adim
δX_i	Derivada de cada fuente de variación i, adim.
μ_i	Incertidumbre asociada a cada fuente de variación i, adim
μ_{rep}	Incertidumbre asociada a la repetibilidad del método, adim
μ_{CE}	Incertidumbre asociada al intercepto del método de regresión lineal, adim .
m	Valor de la pendiente obtenido de la ecuación de regresión lineal, m^{-1} .
μ_L	Incertidumbre asociada a la regla de medición, m.
L	Distancia medida de la aparición del poro, m.
μ_m	Incertidumbre asociada a la pendiente del método de regresión lineal, m^{-1} .

De acuerdo a lo anterior, la incertidumbre asociada a la repetibilidad de la medición se determinó a partir de la siguiente fórmula:

$$\mu_{rep} = \frac{\sigma_{historica}}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

Dónde:

$\sigma_{historica}$ Desviación histórica de los datos del Blow point, adim

n Cantidad de veces que se realiza el ensayo, adim.

$$\mu_{rep} = \frac{0,113}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

En dónde la desviación histórica se obtuvo a partir de los datos proporcionados por la empresa.

$$\sigma_{historica} = \frac{\bar{R}}{d} \quad (16)$$

Dónde:

\bar{R} Rango promedio obtenido de las mediciones de Blow point históricas, adim

d Factor dependiente del número de réplicas en cada ensayo, adim.

$$\sigma_{historica} = \frac{0,0166}{1,128} \quad (17)$$

Es importante mencionar que el valor de d fue tomado de acuerdo a la literatura, en el libro *Handbook for Calculation of Measurement Uncertainty in Environmental Laboratories* (Manual para el cálculo de la incertidumbre de medición en laboratorios ambientales) se especifica que para un total de 2 réplicas el valor corresponde a 1.128 para un 95 % de confianza, y de igual manera el valor de n utilizado en la ecuación 13 corresponde a 2 debido a que el ensayo se realiza por duplicado.

Una vez ejecutados estos cálculos se obtuvo un valor de $\mu_{rep} = 6.5 \times 10^{-3}$ adim para la incertidumbre asociada a la repetibilidad.

Seguidamente, para el cálculo de la incertidumbre asociada a la regla de medición se utilizó la siguiente fórmula:

$$\mu L = \frac{\tau}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

Dónde:

τ Corresponde a la tolerancia del instrumento, m

$$\mu L = \frac{0,05m}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

La tolerancia del instrumento fue tomada del certificado de calibración brindado por la empresa, por lo tanto se cataloga como una evaluación Tipo B, corroborando que en estos documentos se aplicó un factor de cobertura $k=2$ y un nivel de confianza del 95 %, como ya se comentó este documento se encuentra en la sección de Anexos. Por otra parte el factor de división corresponde a $\sqrt{3}$ ya que corresponde a una distribución rectangular.

De acuerdo con las consideraciones anteriores se obtuvo que el valor de incertidumbre asociada a la regla de medición corresponde a $\mu L = 2.9 \times 10^{-2}$ m.

Siguiendo con el análisis de incertidumbre para el cálculo de la pendiente y su respectiva incertidumbre se utilizó como metodología de cálculo el método numérico, las ecuaciones se muestran a continuación:

$$m = \frac{N \sum (x_i * y_i) - \sum y_i \sum x_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (20)$$

Dónde:

m Corresponde al valor de la pendiente de la curva, m^{-1}

N Corresponde al número de puntos de la curva de ajuste, adim.

- x_i Corresponden a los valores de x utilizados para construir la curva, adim.
 y_i Corresponden a los valores de y utilizados para construir la curva, m^{-1} .

$$m = \frac{4 * 0,56 - 1,00 * 2,60}{4 * (2,60)^2 - (2,60)^2} \quad (21)$$

La ecuación anterior corresponde a la utilizada para el cálculo de la pendiente de la curva, de la cual se obtuvo un valor de $m = -2.127 \times 10^{-1} m^{-1}$.

Para el caso de la incertidumbre asociada a la pendiente las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes:

$$\mu_m^2 = \frac{\sum p}{\sum p \sum p.x_i^2 - (\sum p.x_i)^2} \quad (22)$$

Dónde:

- p Corresponde a la ponderación, m^{-1}

$$\mu_m^2 = \frac{1,27 \times 10^7}{1,27 \times 10^7 * 3,16 \times 10^6 - (6,13 \times 10^6)^2} \quad (23)$$

$$\mu_m = \sqrt{\mu_m^2} \quad (24)$$

De esta manera a partir de la ecuación anterior se obtuvo un valor de $\mu_m = 2.2 \times 10^{-3} m^{-1}$

Y en cuanto a la obtención de los valores asociados al intercepto y su respectiva incertidumbre, al igual que en el caso anterior por formar parte de la regresión li-

neal se utilizó el método numérico para la obtención de los datos. El intercepto fue calculado de la siguiente manera:

$$CE = \frac{\sum yi \sum xi^2 - \sum xi \sum xi * yi}{N \sum xi^2 - (\sum xi)^2} \quad (25)$$

Dónde:

CE Corresponde al valor del intercepto de la curva, adim.

$$CE = \frac{1,00 * 2,60^2 - (2,60 * 0,56)}{4 * 2,60^2 - (2,60)^2} \quad (26)$$

El valor obtenido fue de $CE = 3.887 \times 10^{-1}$ adim.

En el caso de la incertidumbre asociada a esta fuente de variación, la ejecución de su cálculo se llevó a cabo haciendo uso de las siguientes fórmulas:

$$\mu_{(CE)^2} = \frac{\sum p.xi^2}{\sum p \sum p.xi^2 - (\sum p.xi)^2} \quad (27)$$

$$\mu_{(CE)^2} = \frac{3,16 \times 10^6}{1,27 \times 10^7 * 3,16 \times 10^6 - (6,13 \times 10^6)^2} \quad (28)$$

$$\mu_{(CE)} = \sqrt{\mu_{(CE)^2}} \quad (29)$$

El valor obtenido fue de $\mu_{(CE)} = 1.1 \times 10^{-3}$ adim.

A partir de los resultados obtenidos de cada cálculo realizado se procedió a calcular la

variación total del ensayo denotada como μ_C , con el uso de la ecuación 12, que como se puede observar representa la sumatoria de todas las variaciones. En el Cuadro 4.1 se resumen las fuentes de variación que se deben utilizar en la fórmula, mismas que fueron detalladas en los párrafos anteriores.

Cuadro 4.1. Resumen del valor calculado para cada fuente de variación contemplada como parte del cálculo de la variación total del ensayo.

Fuente de variación	Valor calculado	Unidades
μ_{rep}	6.5×10^{-3}	adim
μ_L	2.9×10^{-2}	m
μ_m	2.2×10^{-3}	1/m
μ_{CE}	1.1×10^{-3}	adim
μ_C	1.9×10^{-2}	adim

Como se puede observar del Cuadro el valor μ_C , conocida como incertidumbre combinada corresponde a 1.9×10^{-2} adim.

Como último paso del análisis de incertidumbre se tiene que para un $k=2$ con un nivel de confianza aproximado del 95 % el valor de la incertidumbre expandida corresponde a $U = 3.8 \times 10^{-2}$ adim. Este dato de incertidumbre genera un aporte muy pequeño a los datos del blow point obtenidos de la medición, por lo tanto no se considera que el aporte de la incertidumbre al método de medición sea de un impacto relevante para el análisis de oportunidades de mejora.

Finalmente, es importante tener en consideración que este cálculo de incertidumbre es variable, ya que la ecuación obtenida de la regresión lineal va a variar con cada conjunto de datos que se trabaje, por lo tanto, el cálculo de incertidumbre debe de ser recalculado con cada medición de blow point que se realice.

4.8. Análisis de reproducibilidad y repetibilidad (R&R)

Adicionalmente, se trabajó en estudio de repetibilidad y reproducibilidad con el fin de evaluar la precisión del ensayo de medición. Se evaluó la variación total asociada

al ensayo del Blow Point.

Primeramente, fue necesario definir la cantidad de partes seleccionadas para ejecutar el análisis, si no se cuenta con una estimación histórica es necesario considerar un gran número de partes para obtener una estimación precisa de la variación, sin embargo, es habitual utilizar al menos 10 partes, por ende, para el presente trabajo los hules seleccionadas son los siguientes: H1, H5, H6, H7, H10, H11, H15, H23, H26 y H33.

Se realizó la recolección de las muestras (partes) con las cuales se iba a trabajar, las pruebas fueron ejecutadas tal y como lo indica la instrucción de trabajo.

Para efectuar el R&R se seleccionaron 3 operarios y un cuarto operario que fue la referencia (operario con mayor conocimiento en el tema) con el fin de poder ejecutar el análisis de sesgo y linealidad. Cada uno de los 3 operarios debía realizar la lectura de poro para una misma parte por triplicado, aplicando el criterio de alietoridad que está estipulado como requisito para un análisis de este tipo.

Los datos obtenidos por operador se tabulan en los Cuadros A.33, A.34 y A.35 en la sección de Apéndices.

Para realizar el análisis de repetibilidad y reproducibilidad se hizo uso del software Minitab. En el Cuadro 4.2 se muestran los resultados del (R&R) ejecutado a partir de los datos obtenidos.

De acuerdo a los datos arrojados para el estudio de la evaluación del sistema de medición se obtuvo una variabilidad total del 70.81 %. Ahora bien, un sistema de repetibilidad y reproducibilidad se basa en los siguientes criterios de aceptación (Gutierrez y De la Vara, 2009): si el valor es inferior a 10 % esto indica que es un excelente proceso, si está en el rango de 10 % - 20 % el proceso es aceptable, por otro parte si se ubica en el rango de 20 % - 30 % el proceso es marginalmente aceptable y si es superior al 30 % el proceso es inaceptable y debe de ser corregido.

Como se puede observar el valor obtenido es mucho mayor al 30 % lo cual indica

Cuadro 4.2. Datos del porcentaje de variación obtenidos del análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) haciendo uso del software Minitab.

Fuente	Porcentaje de variación, (%)
Estudio de R&R total	70.81
Repetibilidad	14.99
Reproducibilidad	69.21
Operadores	38.72
Operadores*Partes	57.36
Parte a parte	70.61
Variación total	100.00

que el sistema de medición no es aceptable, por ende, se deben de aplicar las medias correctivas para su ejecución.

Por otro lado en el caso de la repetibilidad la variación del proceso es de aproximadamente 15 % y corresponde al caso de que un operador mida la misma muestra varias veces. Y en el caso de que varias personas sean las que miden el mismo elemento, es decir, la reproducibilidad se tiene un valor de variación del proceso de 69.2 %

Los demás casos corresponden al impacto que tienen las interacciones entre factores en la medición de las cuales se comentará más adelante.

A manera gráfica se muestran los resultados arrojados por el estudio. En la Figura 4.14 se puede observar que el rendimiento del proceso es de un 70.8 %, lo cuál ubica el resultado en la zona roja de la barra de evaluación, indicando que el valor arrojado no es aceptable.



Figura 4.14. Evaluación del rendimiento del proceso.

En cuanto a la Figura 4.15 se puede observar el comportamiento que presentó el ensayo para diferenciar partes aceptables de las defectuosas, el dato corresponde a 100.2% ubicado nuevamente en la zona roja de la barra de evaluación, dicho dato se puede confirmar de los datos ya mostrados anteriormente en el Cuadro 4.2.



Figura 4.15. Evaluación del sistema de medición.

Seguidamente, para el caso de la gráfica R por operadores se puede obtener información sobre la consistencia de los operadores para realizar las mediciones. Por ende, si el rango entre las mediciones máxima y mínima es pequeño, en relación a la variación del estudio, los puntos deberían estar bajo control, sin embargo, existen puntos que se sitúan por encima del límite de control superior, esto para el caso específico del operador 3, indicando que no existe consistencia por parte del mismo para la ejecución de las mediciones, situación que se puede evidenciar en la Figura 4.16.

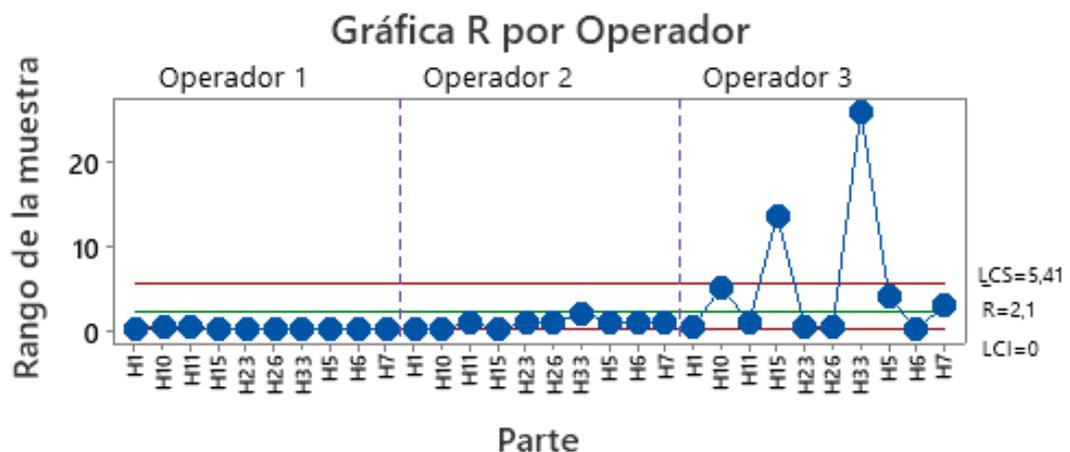


Figura 4.16. Gráfica R por operadores.

La gráfica Xbarra de la Figura 4.17 muestra que la mayoría de los puntos se encuentran más allá de los límites de control. Lo cual indica que existe una variación entre las mediciones de los operarios.

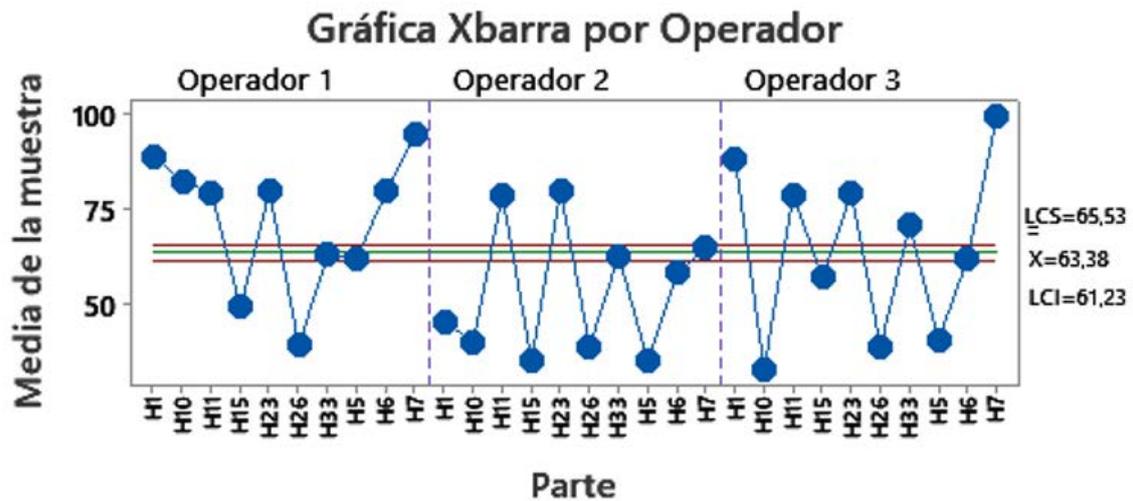


Figura 4.17. Gráfica Xbarra por operadores.

La gráfica de medición por partes que se presenta en la Figura 4.18 permite determinar si las múltiples mediciones de cada parte se encuentran cercanas entre sí. Como se puede observar existe variación para algunas de las partes entre sus respectivas mediciones, ya que los puntos no se encuentran agrupados entre sí, existen puntos que se desvían, por ende, la medición si presenta una variación.

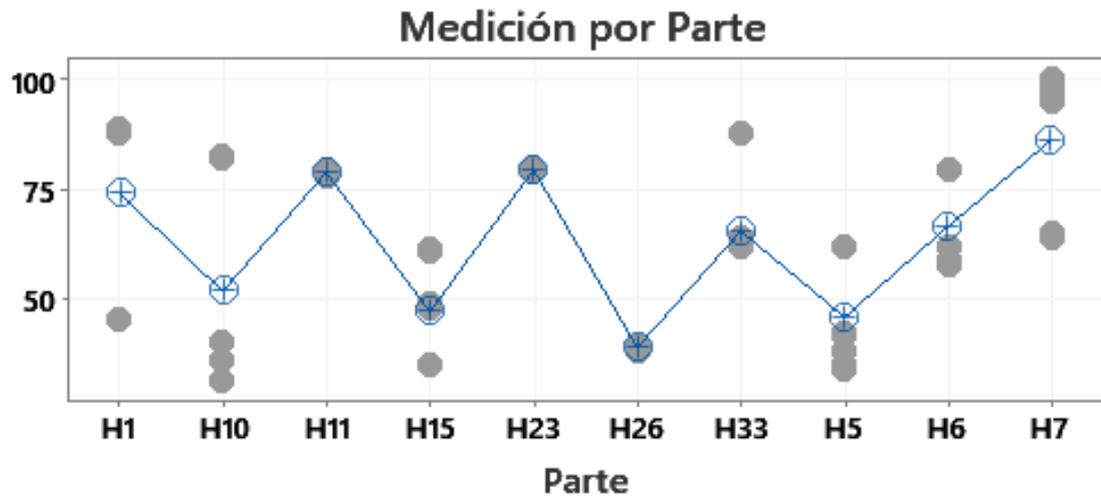


Figura 4.18. Gráfica de medición por partes.

En cuanto a las mediciones por operador que se muestra en la Figura 4.19, se puede observar que existe una similitud en la ejecución de las mediciones entre el operador 1 y 3, y 2 y 3, sin embargo, esta situación no se presenta entre los operadores 1 y 2, ya que al trazar una línea horizontal recta esta no se interseca entre ambos.

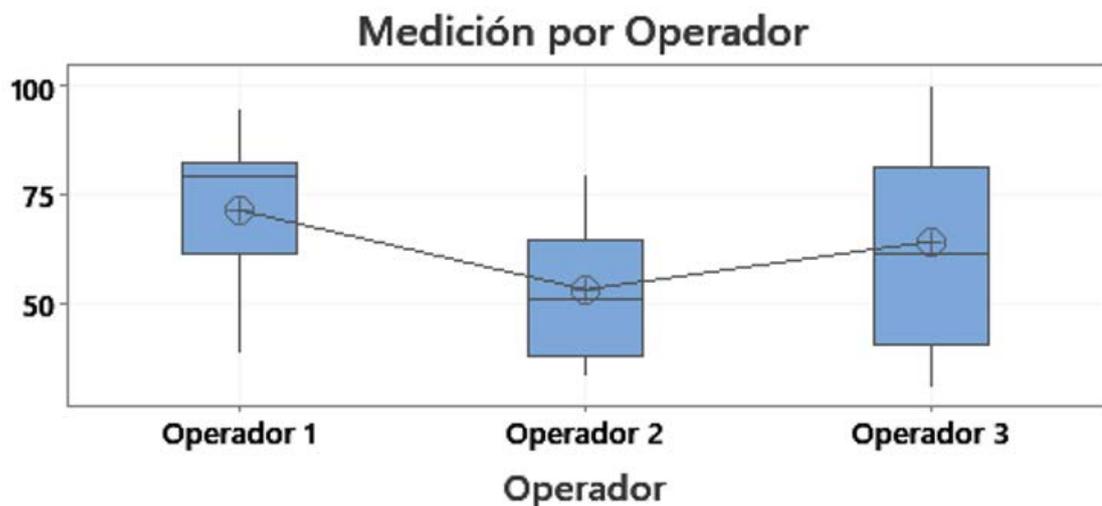


Figura 4.19. Gráfica de medición por operadores.

Finalmente del análisis de los gráficos obtenidos, la interacción por partes se muestra en la Figura 4.20. En donde las líneas que coinciden en un mismo punto representan que para esa parte todos los operadores miden de manera similar, los únicos casos

en donde se presenta este comportamiento son: H23 y H26. En los demás casos las líneas no presentan consistencia entre ellas, indicando que existe un sesgo asociado al operador.

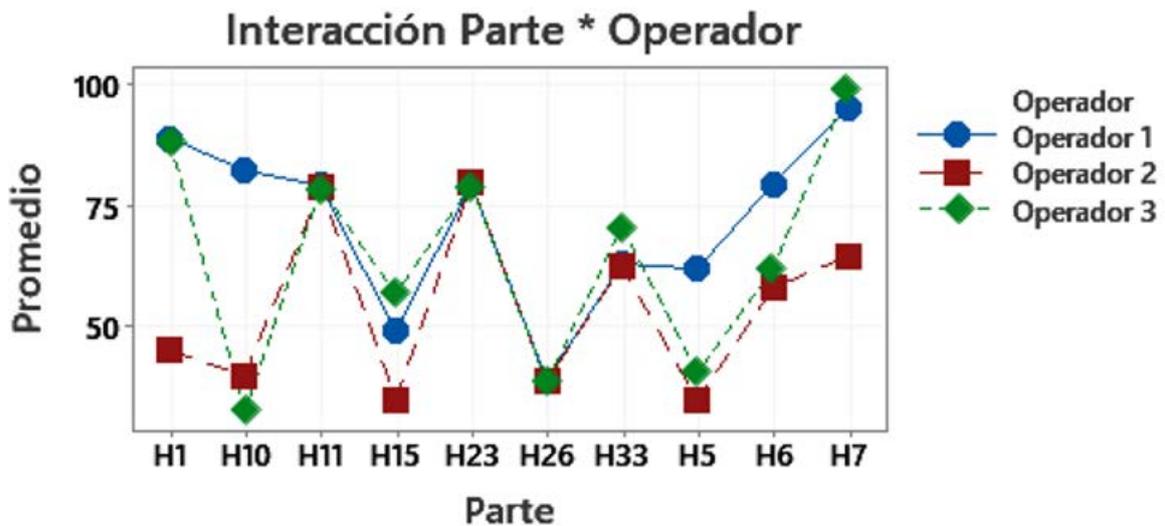


Figura 4.20. Gráfica de medición por operadores.

Por último, en la sección de Apéndices se adjuntan los Cuadros A.36, A.37 y A.38 que muestran información adicional obtenida del análisis de repetibilidad y reproducibilidad R&R a partir de Minitab.

4.9. Análisis de sesgo y linealidad

Adicionalmente, se ejecutó un análisis de sesgo y linealidad a partir de los datos recopilados para el estudio, con el fin de determinar si el sistema de medición está realizando las mediciones con exactitud. A partir de la linealidad se evalúa qué tan exactas son las mediciones en todo el rango esperado de mediciones. Una manera de poder evaluar dicha situación es a partir de la pendiente de la línea ajustada. En cuanto al sesgo de medición este determina qué tanto se parecen las mediciones a un valor de referencia.

Con el análisis de los datos se logró determinar que la linealidad del sistema de medición es significativa. En el Cuadro 4.3 se pueden observar algunos de los datos obtenidos.

Cuadro 4.3. Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición

Pendiente	Intercepto	Valor P de la pendiente	Porcentaje de linealidad, (%)
-0.18769	8.412	0.021	18.8

Por otra parte en la Figura 4.21 se puede observar el gráfico de sesgo y linealidad del análisis ejecutado, el cual representa la diferencia entre el valor medido (sesgo) y el valor real (referencia).

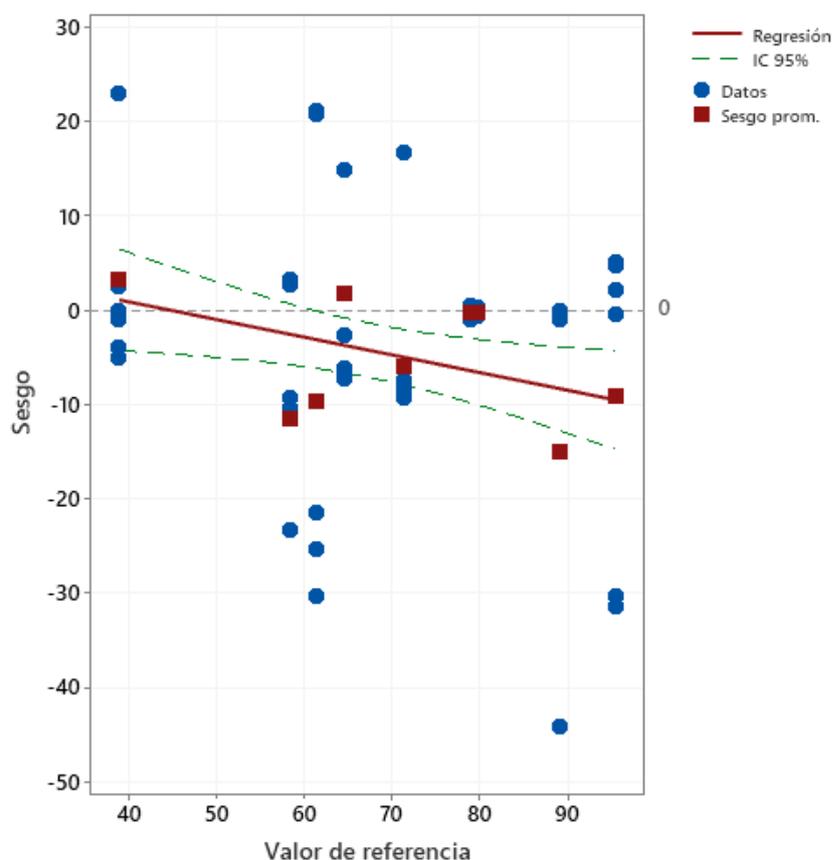


Figura 4.21. Gráfica de sesgo y linealidad del sistema de medición inicial.

Como se puede observar existe una tendencia decreciente de los datos, situación que

responde al valor negativo obtenido de la pendiente, lo anterior indica que la mayoría de los datos están siendo subestimados, es decir, las mediciones se encuentran por debajo de su valor real.

Sin embargo, no es común analizar la linealidad de un sistema de medición a partir del valor de la pendiente y el intercepto, para llevar a cabo el análisis se utiliza el valor P de la pendiente, dato que se observa en el Cuadro ya mencionado. El valor P indica la significancia de los valores de la recta, es decir, si esos valores son efectivamente diferentes de cero desde el punto de vista estadístico.

Según la teoría para evaluar la linealidad del sistema se toma el valor P de la pendiente de la recta y se compara con el valor estadístico de $p \leq 0.05$, en este caso corresponde a 0.021 que es menor a 0.05, por lo tanto se dice que la inclinación observada en la recta es estadísticamente significativa, y que el sistema de medición presenta un problema de linealidad.

Por otro lado, como ya se comentó el sesgo evalúa la similitud entre las mediciones realizadas y el valor de referencia. Para poder determinar si el sesgo de la medición es significativo se evaluaron los resultados que se muestran en el Cuadro 4.4.

Cuadro 4.4. Datos obtenidos para el sesgo del sistema de medición.

Sesgo Promedio	Porcentaje de Sesgo, (%)	Valor P de la pendiente
-4.2811	3.4	0.000

Estos valores corresponden al promedio de los datos obtenidos del análisis de sesgo. En la columna 1 se denota que el valor de la pendiente es negativa, siendo esta la misma situación presentada en el análisis de linealidad en donde los datos mostrarán una tendencia a ser subestimados. No obstante, el valor P de la pendiente es el que evalúa la significancia, es decir, si estos valores son efectivamente diferentes de cero desde el punto de vista estadístico, y nuevamente como ocurrió con la linealidad el valor P de la pendiente es de 0.000 el cual es menor a 0.05, y por ende, el sesgo también es significativo para esta medición.

Del análisis de datos realizado se pudo observar que el sistema de medición debe de ser corregido porque existe un problema de linealidad y también de sesgo. Esto puede implicar no solo un ajuste al sistema de medición o a los instrumentos utilizados sino que puede significar también un cambio en la tecnología de medición, ya que indica que el sistema de medición utilizado no corresponde a uno lineal en donde idealmente todos los valores medidos deberían de coincidir con los reales.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE ENSAYOS DE MEDICIÓN

Las mediciones ejecutadas del Blow Point no solo presentan variación entre diferentes tipos de hule, en un mismo hule con diferentes muestras de un mismo lote (*batch*) existe un alto impacto en la variación, lo cual como ya se ha visto repercute en el cálculo del factor de seguridad. Por lo tanto, conocer el comportamiento de aparición del poro en la muestra es una situación impredecible.

Es por esta razón que el presente capítulo se enfoca en analizar si es posible obtener correlaciones sobre el comportamiento del poro a partir de la búsqueda y análisis de información de dos de ensayos de medición: dispersión de negro de humo y reometría. En el presente capítulo se analizará el motivo de elección para el análisis de correlación de cada uno de estos ensayos con la variable de estudio (Blow Point), así como los resultados obtenidos a partir de dicho análisis.

5.1. Metodología

Primeramente, se realizó un estudio de los tres ensayos de medición: Blow Point, reometría y dispersión de negro humo. Para ello se realizó una investigación bibliográfica en donde se consultaron las prácticas estándar que se relacionaran con cada ensayo, así como las ASTM aplicables, específicamente para la reometría y la dispersión de negro de humo, ya que el ensayo de Blow Point ya había sido estudiado y comprendido previamente.

Posteriormente se procedió a realizar visitas al laboratorio de calidad, lugar donde se ejecutan las pruebas de Blow Point y dispersión de negro de humo para comprender la ejecución del método, también se realizaron visitas al laboratorio de reometría para comprender la ejecución del método de reometría.

Una vez que se logró la comprensión de los métodos, se ejecutaron mediciones de prueba para evaluar si se había comprendido de manera correcta la ejecución de los

pasos en cada ensayo, la utilización de los instrumentos y el análisis de los datos, estas pruebas fueron realizadas bajo supervisión.

Posterior a esta etapa se recolectaron muestras de los hules 5 hules seleccionados como caso de estudio. Los datos obtenidos de las pruebas fueron tabulados en excel para su posterior análisis.

A partir de los datos se realizó un análisis de correlación lineal haciendo uso del software Minitab, en donde se obtuvo la gráfica de dispersión para cada hule y el coeficiente de Pearson, evaluando la correlación entre los métodos (Blow Point-Remotería y Blow Point-Dispersión), así como la ecuación de mejor ajuste para cada caso. Una vez obtenida esta información para aquellos casos en que no se presentó correlación lineal se procedió a realizar un análisis de correlación no lineal en el software JMP, de igual manera se obtuvo el coeficiente de correlación entre los métodos (Blow Point-Remotería y Blow Point-Dispersión).

Finalmente, se determinó si las variables evaluadas como parte del análisis de correlación entre los métodos presentan una influencia significativa en la aparición del poro.

5.2. Análisis de correlación lineal

Una relación lineal es una tendencia de los datos que se puede modelar mediante una línea recta. Cuando ambas variables aumentan o disminuyen de manera simultánea a un ritmo constante, existe una relación lineal positiva. Por otro lado, cuando una variable aumenta mientras la otra disminuye existe una relación lineal negativa. Es común determinar el comportamiento de los datos mediante un análisis gráfico, no obstante existe otra forma de conocer el grado de correlación entre las variables de estudio y esto es través del R^2 .

5.2.1. Correlación lineal entre los ensayos del Blow Point y dispersión de negro de humo

Como parte del análisis de correlación lineal se decidió estudiar el ensayo de la dispersión de negro de humo y su posible correlación con el ensayo del blow point. Los

datos obtenidos de las pruebas se encuentran en los Cuadros A.14,A.15,A.16, A.17 y A.18 de la sección de Apéndices.

El interés de este análisis surgió como respuesta al estudio bibliográfico realizado como parte del desarrollo del proyecto. En la sección *Factores que afectan la porosidad* del Capítulo 2 de acuerdo a lo mencionado por Kaisner y Meincke existen factores influyentes en la formación del poro, uno de estos corresponde a la composición y el mezclado de los materiales. Se dice que un proceso de mezclado con una ineficiente dispersión de los ingredientes que componen la mezcla, podría dar lugar a aglomeraciones del material y con esto promover la aparición de sitios de nucleación, ocasionando porosidad en el mismo.

El negro de humo corresponde al agente de relleno más utilizado, debido a su capacidad de otorgar a la llanta una mayor resistencia a la abrasión, tensión y disipación de calor; razón que lo convierte en uno de los ingredientes fundamentales del proceso de mezclado. La homogeneidad del mezclado es requerida para asegurar la calidad del producto, evitando situaciones indeseables en las condiciones de material, una de estas es la situación antes mencionada con respecto a la porosidad. Es por esto que la empresa se encarga de ejecutar un análisis donde se evalúe el nivel de dispersión que alcanza este material en el proceso de mezclado, para lo cual se utiliza un dispersómetro.

El ensayo de dispersión se ejecuta para todos los hules como parte de los requerimientos corporativos. A través de la medición se pueden obtener una serie de datos sobre el nivel de dispersión del negro de humo, y con esto poder corroborar la calidad del mezclado, sin embargo, el dato de mayor relevancia corresponde al del porcentaje de dispersión de dicho material.

Ahora bien, de acuerdo a lo mencionado anteriormente se analizó si existe una correlación lineal entre los porcentajes de dispersión de negro de humo y la formación

del poro en el hule, esto partiendo del supuesto que una ineficiente dispersión de los materiales en el mezclado promueve la aparición de sitios de nucleación.

Es importante mencionar que este análisis solo se realizó para el material de negro de humo, ya que es uno de los que se encuentra en mayor proporción en el proceso de fabricación de las llantas, adicionalmente es el único método de dispersión estandarizado con el que cuenta la empresa.

A continuación, se presentará el análisis para el hule H23, el cual como se mencionó corresponde al caso base, sin embargo, los demás hules presentan comportamientos similares. En la Figura 5.1 se observa el comportamiento de los datos.

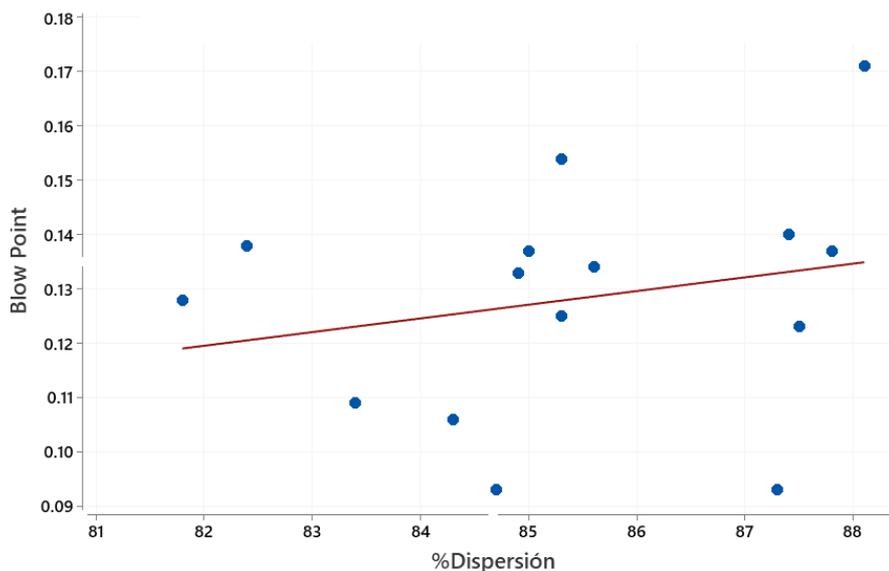


Figura 5.1. Gráfica de correlación lineal entre el Blow Point y el porcentaje de dispersión para el caso del hule H23.

Como se puede observar no existe una correlación lineal evidente en la Figura 5.1, los datos se encuentran dispersos y no presentan una tendencia. Otra manera de evaluar el ajuste de los datos del modelo de regresión es mediante el valor del R^2 , el cual a nivel representa la proporción de la varianza de una variable dependiente que se explica por una o varias variables independientes en un modelo de regresión. Dicho de otra manera, determina qué tan bien se ajustarán los datos al modelo de regresión. Por ende, entre más cercano al 1 se encuentre el valor obtenido, mejor ajuste de los

datos se tiene del modelo de regresión. La fiabilidad de la función extraída del modelo de regresión depende de cual sea el valor de R^2 .

Para este caso se obtuvo un valor de R^2 de 0.0540, de acuerdo a los requerimientos de la empresa se considera un valor aceptable de 0.8, es por esto que con base en el resultado obtenido se determinó que para el caso del hule H23 no existe un modelo de correlación lineal entre el blow point y el porcentaje de dispersión de negro de humo. En el Cuadro 5.1 se presentan los modelos obtenidos para el ajuste de los datos, así como los distintos valores de R^2 para los diferentes tipos de hules estudiados.

Cuadro 5.1. Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y Porcentaje de Dispersión para los hules de estudio seleccionados, haciendo uso de Minitab.

Hule	Modelo de correlación lineal	Valor del R^2
H6	Blow Point = $0.0874 + 0.002523 * \% \text{Dispersión}$	0.0123
H7	Blow Point = $-0.01293 + 0.005022 * \% \text{Dispersión}$	0.0351
H16	Blow Point = $0.1190 + 0.000352 * \% \text{Dispersión}$	0.0233
H23	Blow Point = $0.8997 - 0.005956 * \% \text{Dispersión}$	0.0540
H33	Blow Point = $0.6811 - 0.004075 * \% \text{Dispersión}$	0.0876

Como se puede observar en este cuadro también se encuentran las ecuaciones obtenidas del análisis de correlación lineal para los otros hules de estudio seleccionados previamente. En la Figura 5.2 se observa la gráfica obtenida para cada caso.

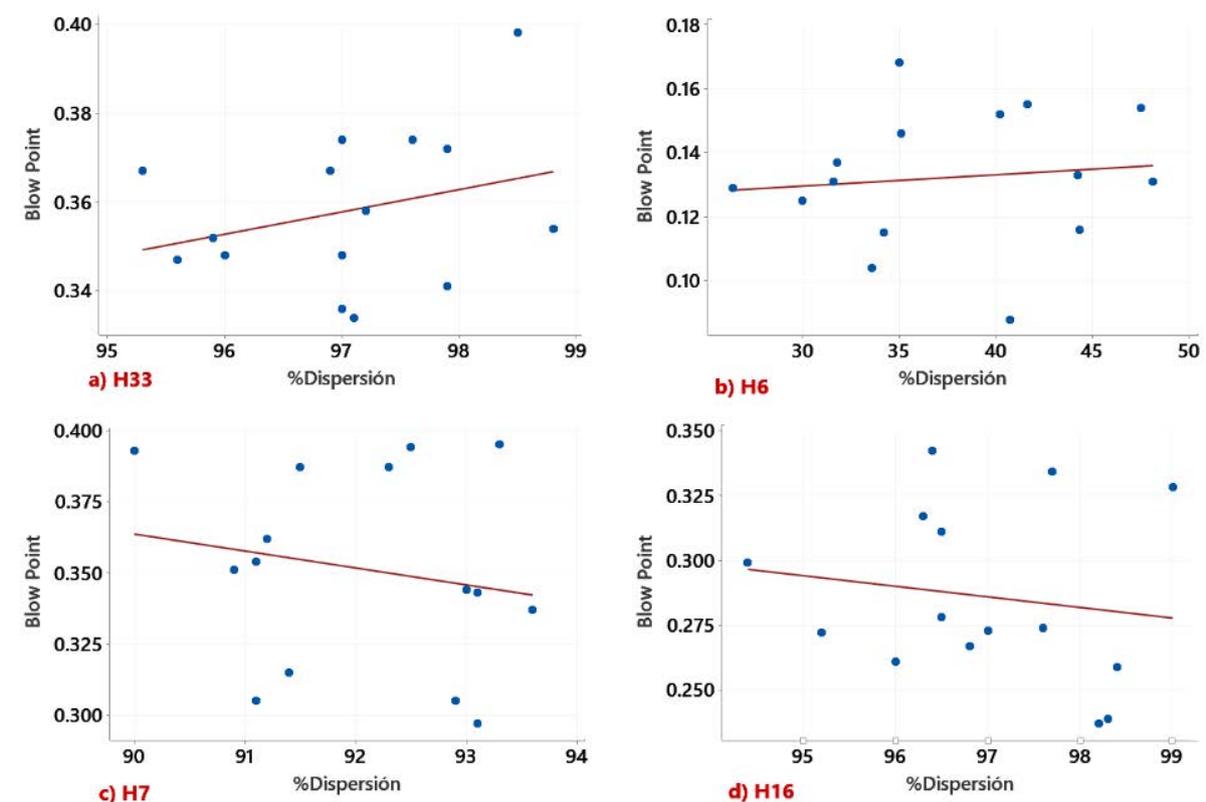


Figura 5.2. Gráficas de correlación lineal entre el Blow Point y el Porcentaje de dispersión para los hules de estudio seleccionados: a)H33, b)H6, c)H7 y d)H16

Con base en el análisis de datos realizado se logró demostrar que no existe correlación lineal en ninguno de los ensayos. Es por esta razón que es requerido recurrir a la realización de un análisis de correlación no lineal.

5.2.2. Correlación entre los ensayos del Blow Point y reometría

Al igual que en el caso anterior se realizó un análisis de correlación lineal para determinar la correlación existente entre el Blow Point y la reometría. Dicho planteamiento se realizó basado en el supuesto de que ambos métodos miden el grado de avance de la reacción.

El monitoreo de la reacción de vulcanización mediante reometrías de vulcanización, permite establecer los tiempos óptimos y las velocidades máximas de vulcanización

a una determinada condición de temperatura. La temperatura es una variable que influye directamente en las propiedades físicas y químicas del compuesto de caucho natural vulcanizado (Yepes *et al.*, 2017).

Es por esto que como parte del ensayo una variable de control corresponde a la temperatura de referencia, para este caso el análisis se realizó a 433.15 K (160 °C) y a 473.15 K (200 °C) por requerimientos de la empresa; a partir del ensayo se puede obtener información sobre varios parámetros de interés, el torque es uno de ellos, sin embargo, para este caso el TC50 y TC90 corresponden a los parámetros de interés para realizar la correlación, esto se debe a que a partir de estos se puede obtener información sobre el tiempo de curado necesario para que la reacción de vulcanización alcance el 50 % y 90 % de avance de reacción respectivamente. Con el análisis de los datos se puede determinar el tiempo requerido para alcanzar este grado de avance de reacción, y con dicho tiempo predecir el comportamiento en la aparición del poro en el ensayo del Blow Point.

A continuación, se presenta el análisis de resultados para el caso del hule H23 (caso base de estudio). Como se puede observar en la Figura 5.3 para el análisis de las variables de estudio en este caso (TC50 y TC90) no existe una correlación lineal evidente en ninguno de los casos, los datos se encuentran dispersos y no presentan una tendencia.

Este mismo análisis gráfico se ejecutó para los demás hules de estudio (H6,H7,H16 y H33), y al igual que en este caso, ninguno de los hules mostró un comportamiento de tendencia lineal, esto se puede observar en las Figuras A7,A8,A9 y A10 en la sección de Apéndices.

Continuando con el análisis del hule seleccionado (H23), se puede corroborar que no existe linealidad con ninguno de las variables estudiadas, de acuerdo al valor de R^2 . En el Cuadro 5.2 se muestran los valores obtenidos.

Los valores de R^2 para los demás hules de estudio se encuentran en el Cuadro A.24 de la sección de Apéndices.

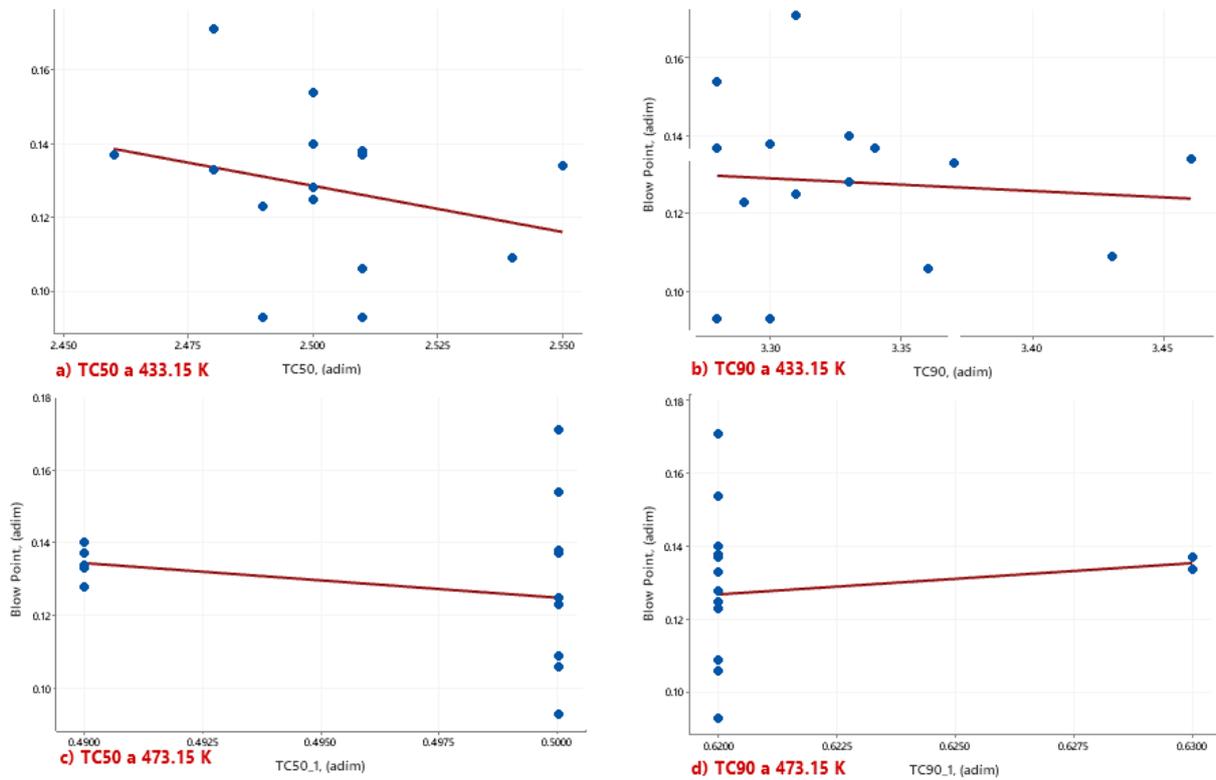


Figura 5.3. Gráficas de correlación lineal entre el Blow point y el ensayo de reometría para el hule en estudio H23: a)TC50 a 433.15K, b)TC90 a 433.15 K, c)TC50 a 473.15 K y d)TC90 a 473.15 K

Cuadro 5.2. Valores de R-cuadrado obtenidos para el hule H23 como parte del análisis de correlación entre blow point y reometría, para la temperaturas de 433.15 K y 473.15 K

Tipo de Hule	Valor R-cuadrado			
	433.15 K		473.15 K	
	TC50	TC90	TC50	TC90
H23	0.0700	0.0070	0.0480	0.0200

Por otra parte, en el Cuadro 5.3 se muestran modelos de correlación lineal obtenidos del análisis gráfico para el caso base. En cuanto a los demás hules de estudio, los modelos de correlación lineal se muestran en los Cuadros A.25, A.26, A.27 y A.28 de la sección de Apéndices.

Cuadro 5.3. Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y reometría para el hule de estudio (H23), haciendo uso de Minitab.

Variable de estudio	Modelo de correlación lineal
TC50 (433.15 K)	Blow Point = $0.7543 - 0.2503 * TC50$
TC90 (433.15 K)	Blow Point = $0.2366 - 0.0326 * TC90$
TC50 (473.15 K)	Blow Point = $0.5999 - 0.950 * TC50$
TC90 (473.15 K)	Blow Point = $-0.405 + 0.858 * TC90$

5.3. Análisis de correlación no lineal

Con base en los resultados obtenidos se procedió a realizar un análisis de correlación no lineal por medio del software JMP, con el fin de conocer los valores de correlación entre las variables de estudio y determinar cuál presenta mayor relación con el Blow Point.

5.3.1. Correlación no lineal entre los ensayos del Blow Point y dispersión de negro de humo

Para el caso de la dispersión se realizó una análisis de correlación no lineal y los resultados obtenidos se muestran a continuación, en el Cuadro 5.4.

Cuadro 5.4. Datos obtenidos para el análisis de correlación no lineal entre el Blow Point y la dispersión de negro de humo por medio del software JMP

Hule	Valor de correlación
H6	0.3956
H7	0.5041
H16	0.4397
H23	0.2198
H33	0.6053

Para el caso de los datos obtenidos se puede observar que el mayor valor corresponde a 0.6053 siendo este inferior a los requerimientos de la empresa.

5.3.2. Correlación no lineal entre los ensayos del Blow Point y reometría

En cuanto al caso de la reometría los resultados obtenidos del análisis para el caso base(H23) se muestran en el Cuadro 5.5.

A partir de los datos se puede observar que el valor más elevado de correlación entre el Blow Point y las variables de estudio corresponde a 0.2641, siendo este mucho inferior a los requerimientos de la empresa.

Cuadro 5.5. Matriz de de correlación no lineal obtenida a partir del software JMP para el caso del hule H23.

	Blow Point	TC50 (433.15 K)	TC90 (433.15 K)	TC50 (473.15 K)	TC90 (473.15 K)
Blow Point	1.0000	-0.2641	-0.0831	-0.2182	0.1420
TC50 (433.15 K)	-0.2641	1.0000	0.7495	0.1306	0.5069
TC90 (433.15 K)	-0.0831	0.7495	1.0000	-0.3059	0.5141
TC50 (473.15 K)	-0.2182	0.1306	0.3059	1.0000	-0.1387
TC90 (473.15 K)	0.1420	0.5069	0.5141	-0.1387	1.0000

Finalmente, este mismo análisis se ejecutó para los demás hules de estudio, los resultados se encuentran en la sección de Apéndices, Cuadros A.29,A.30,A.31, y A.32.

5.4. Determinación de variables con mayor influencia en la aparición del poro

Del análisis de resultados realizado se pudo observar que no existe correlación lineal entre las variables de estudio, tanto para el caso de Blow Point-Reometría así como Blow Point-Porcentaje de dispersión, es por esto que se procedió a ejecutar el análisis no lineal multivariable.

A partir de este análisis se determinó que no existe correlación entre el Blow Point

y la variables de estudio, sin embargo, el mejor resultado se obtuvo para el caso del Blow Point y el TC90 al 433.15 K (160 °C), en dónde la correlación obtenida fue de 0.6445, la más cercana al 0.8, por lo tanto, no se puede afirmar que exista ningún tipo de correlación entre las variables seleccionadas, ni el porcentaje de dispersión de negro de humo ni el avance de reacción por medio de la reometría corresponden a factores que permiten predecir el comportamiento en la aparición del poro en el ensayo del Blow Point.

CAPÍTULO 6

PROPUESTA DE OPORTUNIDADES DE MEJORA QUE INVOLUCRAN EL FACTOR DE SEGURIDAD INVOLUCRADO EN EL CICLO DE VULCANIZACIÓN

6.1. Introducción

Como se pudo observar la variación total de la medición fue de 71 %, dato extraído del análisis de repetibilidad y reproducibilidad inicial. Razón por la cual es necesario llevar a cabo la búsqueda de oportunidades de mejora para lograr la validación de los datos.

6.2. Metodología

Inicialmente se revisaron los documentos donde se hace alusión a la manera en que se ejecuta el ensayo (instrucción de trabajo y práctica estándar). Dichos documentos ya habían sido comparados anteriormente con el fin de verificar que las instrucciones de trabajo fueran idénticas en ambos casos, sin embargo, para este caso el enfoque consistió en analizar cada uno de los pasos a seguir y evaluar la posibilidad de mejoras en caso de que las tuviese. Adicionalmente, se consultaron otros documentos con los que contaba la empresa en donde se encontró información del ensayo, esta información se comparó con la de los documentos anteriormente mencionados y se detectó que existían varios puntos que podrían ser evaluados como implementaciones a la manera en que se ejecuta actualmente el Blow Point.

Las diferencias encontradas entre documentos fueron documentadas en una lista, dicha información se discutió con el ingeniero a cargo así como con el encargado de laboratorio, y con base en el análisis de la información se decidió mejorar la redac-

ción de la instrucción de trabajo, incluyendo información relevante para la ejecución del ensayo. Adicionalmente se trabajó en la elaboración de ayudas visuales complementarias a los procedimientos e instrucciones de trabajo vigentes.

Finalmente, con las oportunidades de mejora implementadas se ejecutó un nuevo análisis de repetibilidad y reproducibilidad de la medición, con el fin de evaluar el impacto de dichas mejoras.

Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo de los datos de blow point para los hules seleccionados con mayor variabilidad, haciendo uso de gráficos de control en donde se visualizó la influencia de los cambios ejecutados a nivel del ensayo.

Finalmente se realizó una comparación del antes (año 2020) y el después (año 2021) del valor obtenido en el cálculo del factor de seguridad con el fin de determinar si hubo una mejora en los datos.

6.3. Modificación del contenido de la instrucción de trabajo

A partir de los hallazgos obtenidos se procedió a modificar la instrucción de trabajo. Se le agregó una tabla de datos con el peso en gramos que debe de tener el tipo de hule, esto con el fin de lograr una estandarización en la preparación de las mismas, más adelante se detallará sobre la implementación de dicha tabla. También se agregó la implementación de nuevos pasos, uno de ellos corresponde a agregar un antihaderante a los moldes, evitando que el hule se quede pegado a los mismos y genere un exceso de vulcanización, el otro paso corresponde a la eliminación de burbujas de aire utilizando otro instrumento adicional al punzón ya descrito en el procedimiento, con la aplicación de este instrumento se pretende reducir la mayor cantidad de aire atrapado en la muestra posterior al proceso del molino, y con esto evitar que se formen burbujas de aire que compliquen la lectura del poro.

Por otra parte, se agregaron imágenes como parte de la ayuda visual en la preparación de las muestras. Y finalmente se detalló sobre algunos pasos en donde la información era imprecisa o muy limitada.

6.4. Elaboración de ayuda visual de pesos por tipo de hule

La práctica estándar en la sección de preparación de la muestra indica que según el tipo de molde la muestra debe de ser recortada y pesada, las especificaciones corporativas indican que el peso depende de la gravedad específica de cada hule multiplicada por una constante, sin embargo, a nivel de ejecución de método esto no se estaba aplicando tal y como lo indica el procedimiento, ya que no se tomaba en cuenta la gravedad específica por tipo de hule. La manera en que se trabajaba el peso de la muestra era a partir de un dato aproximado de peso que se encontraba en el procedimiento y contemplando un ± 5 g.

Por lo que se decidió cumplir con lo establecido en las instrucciones, utilizando la gravedad específica por tipo de hule. Para ello se tomó el registro histórico de la gravedad específica del año anterior, los datos se tabularon según el tipo de hule, tomando la mediana como valor final para la realización de los cálculos. Seguidamente, con el dato extraído y haciendo uso de la constante especificada a nivel corporativo se procedió a la obtención del valor de peso que debe de contemplarse en el momento de la preparación de la muestra.

A partir de los datos se construyó una tabla con la información, la cual se agregó a la instrucción de trabajo ya mencionada, y adicionalmente se incorporó como una ayuda visual con la que contará el operario en el momento de la ejecución de la prueba, facilitando la información al mismo.

Es importante recalcar que dicha tabla se debe de actualizar de manera anual con los datos de la gravedad específica del año anterior.

La misma no se muestra en el presente documento por términos de confidencialidad, ya que es propiedad de la empresa, así como la formulación correspondiente.

6.5. Elaboración de ayuda visual para la lectura del poro

Del estudio R&R realizado se determinó que la problemática del método reside principalmente en el momento en que se realiza el análisis del poro en la muestra, es decir, en la lectura de la porosidad. A nivel de método se detectó que inclusive

cuando una misma persona realiza la lectura múltiples veces aporta un porcentaje de variación del 15 %. Esto se debe principalmente a la confusión de criterios aplicados para discernir las siguientes situaciones: si lo que se observa es porosidad o aire atrapado en la muestra, el inicio de la porosidad, si es necesario repetir la muestra variando el CE para obtener mejor indicio de porosidad. Las situaciones descritas generan confusión y falta de criterio, es por esto que se planteó la implementación de una ayuda visual, esta ayuda visual es una manera gráfica que le permite al operario que ejecute la medición tener un apoyo en la toma de decisiones de la prueba, de manera tal que la decisión no quede subjetiva al usuario, ya que como se observó no solo existe diferencia entre la lectura para las mediciones realizadas por los diferentes operarios, sino que también al ser el mismo operario el que ejecuta la lectura.

La propuesta se abarcó de la siguiente manera, primeramente se realizaron observaciones sobre la tipología del poro en todos los hules que produce la empresa, de esta manera se categorizaron tipos de poro y se plantearon los diferentes casos en los que se puede presentar la aparición del mismo, en la sección de Apéndices se adjunta dicha ayuda visual, en donde se visualizan las fotografías tomadas para ejemplificar cada situación o caso. Adicionalmente, se tomó en consideración agregar una sección de texto en donde se detalle la razón que describe el comportamiento en la aparición del poro, en caso de que lo exista y la contramedida que se debe de aplicar si el poro(s) detectados no cumplen con los requisitos para ser aprobados en la lectura del poro, es decir, en caso de ser necesario repetir la prueba. A manera de ejemplo, en la Figura 6.1 se muestra un caso de los implementados en la ayuda visual.



Figura 6.1. Caso 1 de la ayuda visual utilizada para la lectura del poro en la muestra. *(Elaboración propia).*

6.6. Análisis de repetibilidad y reproducibilidad posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora

A partir de los resultados arrojados del análisis inicial de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) se concluye que es necesario la aplicación de las oportunidades de mejora ya descritas, una vez que estas fueron implementadas se procedió a la realización de este nuevo análisis con el cual se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en el Cuadro 6.1.

Cuadro 6.1. Comparación del porcentaje de variación obtenido del análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) previo y posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora, haciendo uso del software Minitab.

Fuente	Antes	Después
	Porcentaje de Variación (%)	
Estudio de R&R Total	70.81	7.56
Repetibilidad	14.99	1.11
Reproducibilidad	69.21	7.47
Operador	38.72	0.00
Operador*Partes	57.36	7.47
Parte a Parte	70.61	99.71

Como se puede observar para esta ocasión del sistema de medición posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora se obtuvo una variación total del 7.56 %, y de acuerdo a los criterios de aceptación ya antes mencionados en el Capítulo 4 si el porcentaje obtenido del estudio es $\leq 10\%$ se dice que es un excelente proceso. Esto se puede observar en la Figura 6.2.



Figura 6.2. Evaluación final del sistema de medición.

En esta Figura se ejemplifica que el valor se encuentra comprendido en la zona verde que corresponde a una buena evaluación del rendimiento del proceso. Por lo tanto, se logró cumplir con la reducción de un 63.25 % del porcentaje de variación total del sistema con respecto al que se presentó inicialmente.

Por otra parte se puede observar que los valores del porcentaje de variación para la repetibilidad y reproducibilidad también se lograron disminuir, pasando de un 14.99 % a un 1.11 % y de un 69.21 % a un 7.47 % respectivamente.

Esta situación es favorable, ya que indica que se logró reducir la variación entre las

mediciones que realiza una misma persona de manera repetitiva a la misma muestra, logrando una mayor precisión de los datos obtenidos, pero adicionalmente también se obtuvo este comportamiento para el caso de que sean distintas personas las que realicen la medición (reproducibilidad), es decir, se alcanzó la meta de que el método fuera repetible y reproducible.

6.7. Análisis de sesgo y linealidad

Por otra parte del análisis de sesgo y linealidad se obtuvo que para el caso de la linealidad esta es significativa. Los resultados obtenidos del análisis del sistema de medición se muestran en el Cuadro 6.2.

Cuadro 6.2. Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición final.

Pendiente	Intercepto	Valor P de la pendiente	Porcentaje de linealidad, %
-0.07720	5.166	0.000	7.7

Del análisis de los datos, se tiene que el valor P de la pendiente es de 0.000 siendo este inferior al estadístico p de 0.05, por lo tanto se sabe que la linealidad es significativa. En la Figura 6.3 se puede evidenciar que adicional a esto la recta presenta una pendiente negativa, indicando que los datos presentan una tendencia decreciente y que las mediciones continúan siendo subestimadas.

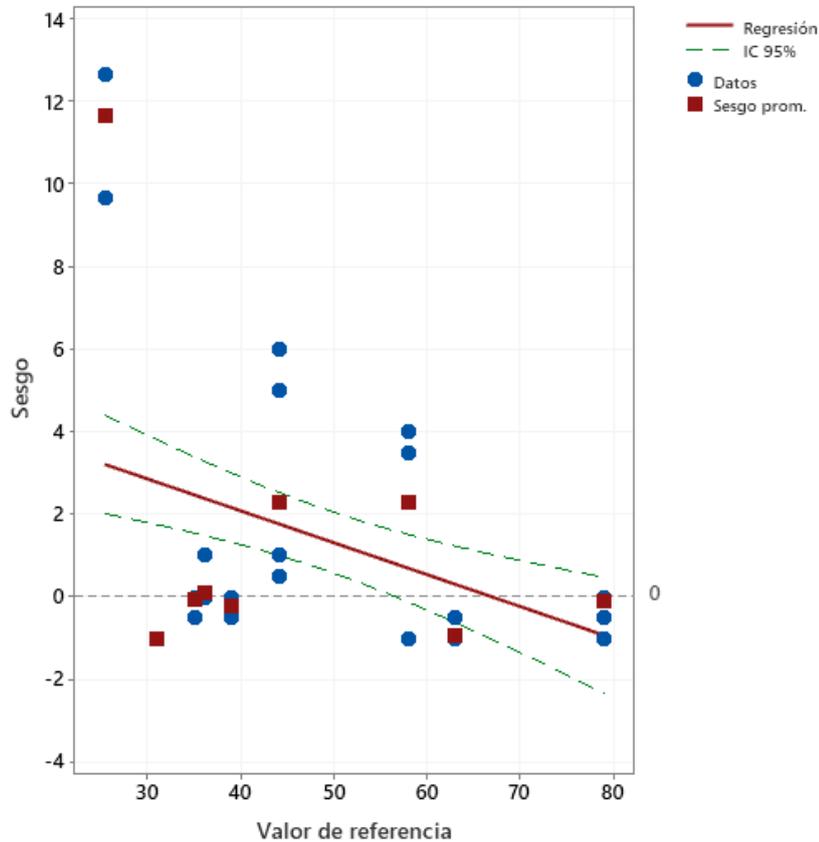


Figura 6.3. Gráfica de sesgo y linealidad del sistema de medición final.

Ahora bien, en el Capítulo 4 se comentó sobre los resultados obtenidos del análisis de sesgo y linealidad para el sistema de medición inicial, es decir, cuando aún no se habían ejecutado las oportunidades de mejora, para este caso se obtuvo una linealidad significativa y una tendencia decreciente de los datos, situación que se mantiene de acuerdo a los resultados mostrados en este apartado.

Sin embargo, si se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos en ambos sistemas de medición (inicial y final) se puede observar que el porcentaje de linealidad se redujo para en el sistema de medición final, pasando de 18.8 % (inicial) a 7.7 %, lo cuál es una situación deseable ya que como se había comentado siempre se desean valores bajos de linealidad.

Es importante tener en cuenta que de igual manera el método de medición sigue presentando una oportunidad de mejora en este aspecto, implicando un ajuste al

sistema actual o contemplando la oportunidad de cambiar la metodología de medición de manera que los valores medidos coincidan con los reales.

Por otra parte, también se volvió a realizar un análisis del sesgo de medición posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora. Del cual se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 6.3

Cuadro 6.3. Datos obtenidos para el sesgo del sistema de medición final.

Sesgo Promedio	Porcentaje de Sesgo, %	Valor P de la pendiente
1.3889	1.3	0.000

Nuevamente el valor P de la pendiente arroja que el sistema de medición presenta un sesgo significativo, ya que el valor obtenido es de 0.000 siendo inferior al 0.05 del estadístico. Esto indica que las mediciones realizadas y la referencia difieren entre sí.

Por otra parte en la columna 1 de dicho Cuadro se denota que el valor de sesgo promedio para este caso es positivo, esto indica que en su mayoría las mediciones de las partes analizadas están siendo sobrestimadas, es decir, el dato de la medición realizada es superior al de referencia, en este caso la situación cambió con respecto al sistema de medición inicial (previo a la aplicación de oportunidades de mejora), en donde el sesgo promedio de mediciones arrojó que se estaba subestimando.

Sin embargo, si se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos en ambos sistemas de medición (inicial y final) se puede observar que el porcentaje de sesgo también se redujo para en el sistema de medición final, pasando de 3.4 % (inicial) a 1.3 % (final), lo cuál es una situación deseable ya que un sistema de medición también se desean porcentajes bajos de sesgo.

A partir del análisis de datos del sistema de medición final (post implementación de las oportunidades de mejora) se obtuvo como resultado una mejoría tanto a nivel del porcentaje de linealidad como del de sesgo, en ambos ocurrió una reducción del porcentaje, siendo esta una situación deseable, sin embargo, cabe resaltar que el

sistema de medición sigue presentando oportunidades de mejora en este aspecto, por lo que es recomendable una evaluación del mismo, metodología, instrumentos utilizados e inclusive es importante considerar la opción de aplicar un método de medición a futuro en dónde se tenga una tecnología que aporte mayor linealidad al sistema de medición.

6.8. Análisis comparativo de los datos del Blow Point para el hule de mayor variabilidad posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora.

Como método de evaluación de los datos del blow point posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora se procedió a la elaboración gráficos de control los cuales permitieran evidenciar la tendencia de los datos a través del tiempo. De acuerdo a lo comentado en el Capítulo 4 el hule seleccionado como caso base de estudio corresponde al H23 debido a que presentó la mayor variabilidad e impacto en la capacidad del proceso, y además es de alta producción en la empresa por lo que corresponde a un hule de especial interés. Es por esta razón que se hará énfasis en el mismo. En la Figura 6.4 se evidencia el gráfico de control para este caso.



Figura 6.4. Gráfico de control sobre la variación del Blow Point a través del tiempo para el hule H23.

Tal y como se puede observar se presentan los registros de la medición del blow point para los años 2019, 2020 y 2021, todos los datos se encuentran por debajo

del límite máximo de control, sin embargo, se evidencia una marcada fluctuación de los datos, no obstante para el período del 2021 la fluctuación en la variación de los datos disminuyó, se puede observar que todos los valores se encuentran en un rango de Blow Point de (0.05-0.10) adim.

Lo anterior se da como respuesta a las mejoras aplicadas al método de medición, cabe aclarar que finalizando el mes de octubre del año 2020 se comenzó con la aplicación de algunas oportunidades de mejora dentro de las cuales se encuentran: la aplicación del antihaderente de los moldes (dopping) de una manera más recurrente a la que se especificaba en la práctica estándar, esto debido a que se notó que algunas muestras se quedaban pegadas a los moldes siendo esta una situación indeseable en la ejecución del método. Otra de las oportunidades de mejora aplicada inicialmente fue lograr una mejor eliminación del aire atrapado en la muestra haciendo uso de un instrumento con el que contaba la empresa, estos pasos se modificaron en la instrucción de trabajo. Adicionalmente se creó una mayor consciencia en los operarios para la ejecución de la prueba, al tener un mayor cuidado en pequeños detalles de la preparación de la muestra y en la lectura del poro.

Lo anterior se puede atribuir a las mejoras aplicadas, no obstante fue hasta el inicio del año 2021 cuando se implementaron las ayudas visuales.

De los resultados obtenidos para el nuevo análisis R&R posterior a la aplicación de estas medidas se pudo observar la reducción de la repetibilidad y la reproducibilidad como respuesta a la mejora en la lectura del poro, y esto se debe a que los operarios ya contaban con una guía visual que les permitió tener un criterio más claro en la elección del poro o dicho de otra manera en la elección del inicio de la porosidad (distancia) para la muestra en estudio.

Durante el análisis de resultados se hace énfasis en el hule H23, sin embargo, seguidamente se comenta de manera breve sobre el análisis de los gráficos de control para los demás hules seleccionados.

En el caso del hule H6 representado en la Figura 6.5 se puede observar una tendencia más constante de los datos para el período del 2021, no se observa una fluctuación de los datos súbita como sí ocurre en los otros períodos.

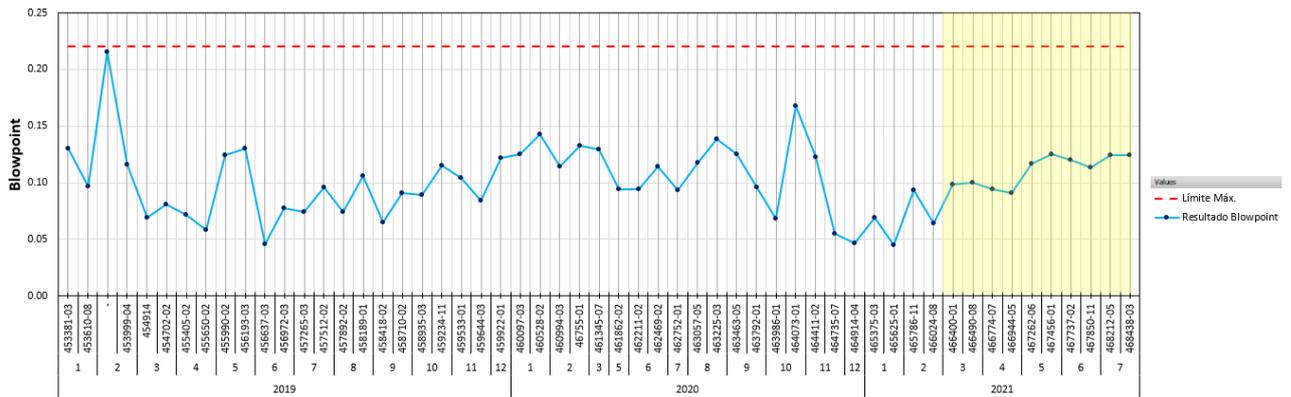


Figura 6.5. Gráfico de control sobre la variación del Blow Point a través del tiempo para el hule H6.

En cuanto al hule H7 Figura 6.6 aunque se puede observar una fluctuación de los datos, este hule corresponde a uno de los hules en el cual los valores obtenidos superan el límite superior de control, no obstante según lo reflejado en el período del 2021 se obtuvo un mejor comportamiento de los datos para dicha situación.

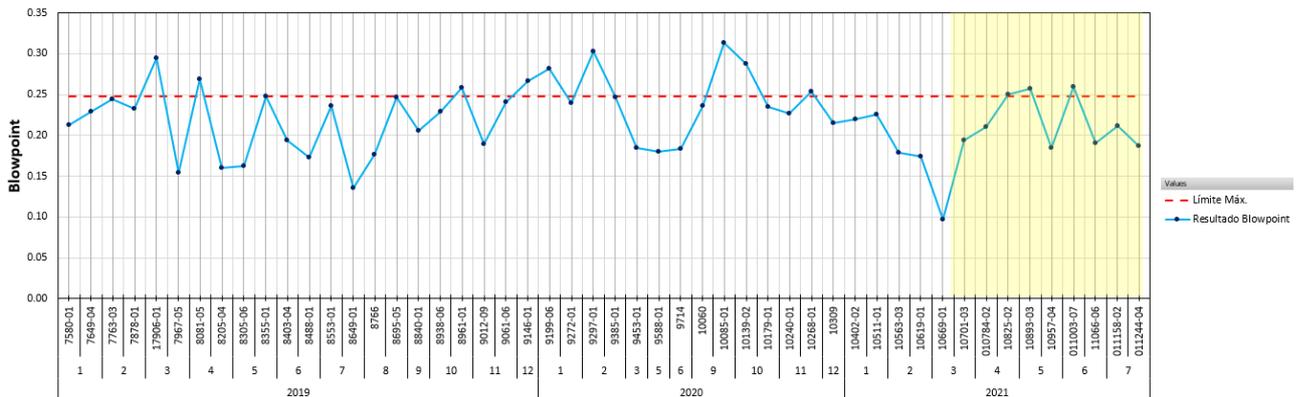


Figura 6.6. Gráfico de control sobre la variación del Blow Point a través del tiempo para el hule H7.

El hule H16 que se encuentra en la Figura 6.7 también presenta una tendencia más

constante y todos los valores obtenidos se encuentran por debajo del límite superior de control para este período.

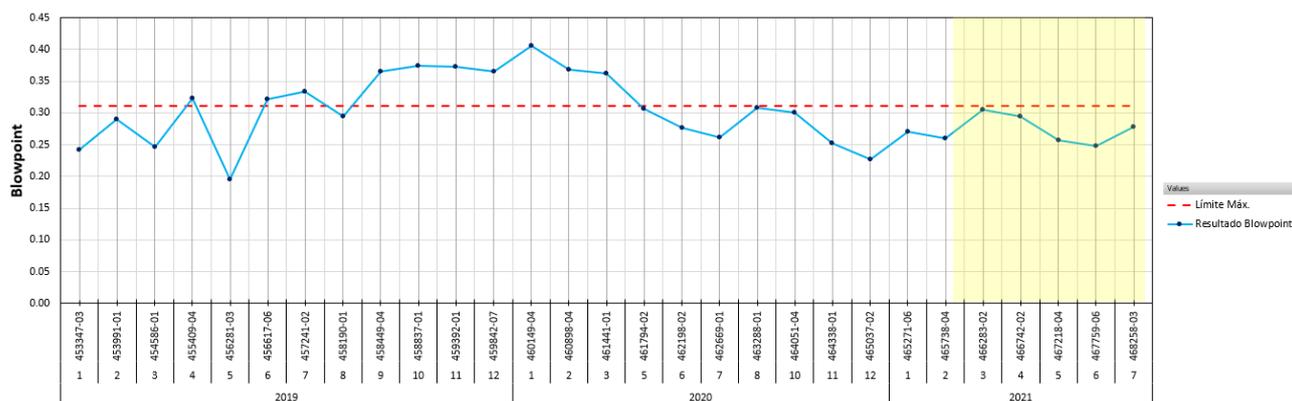


Figura 6.7. Gráfico de control sobre la variación del Blow Point a través del tiempo para el hule H16.

Y por último en el caso del hule H33 que se muestra en la Figura 6.8 al igual que en el caso del H7 es un hule en el que los datos obtenidos tienden a superar el límite de control superior, y aunque para este caso la tendencia no se muestra tan constante, sí se puede observar que se logró para el período del 2021 una tendencia en la cual los datos no sobrepasan este límite de control.

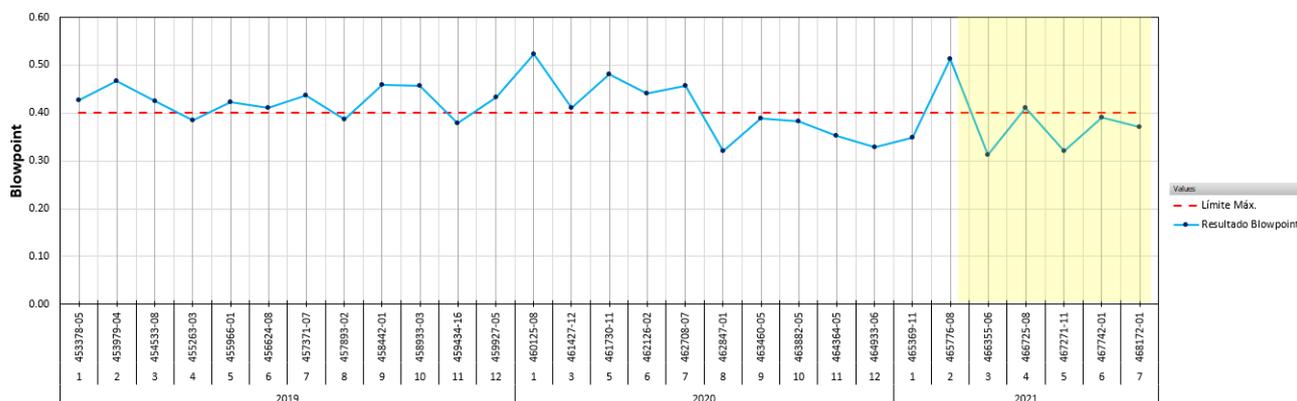


Figura 6.8. Gráfico de control sobre la variación del Blow Point a través del tiempo para el hule H33.

Como se puede observar de todas las gráficas obtenidas , el caso del hule H23 es el

que presenta una tendencia de los datos más constante, todos los hules presentan un comportamiento distinto en la aparición del poro, y es por esta razón que la variación de los datos puede diferir en todos los casos, sin embargo, a nivel general se pudo denotar que existen mejoras en el comportamiento de los datos para todos los hules de estudio.

6.9. Comparación del factor de seguridad previo y posterior a la aplicación de oportunidades de mejora.

El factor de seguridad es un cálculo que se lleva a cabo de manera anual con base en los resultados obtenidos de las 7 variaciones que fueron mencionadas en el Capítulo 3. Para la obtención del resultado de cada variación se procede a utilizar la metodología de cálculo estipulada en la práctica estándar BL005, y posterior a esto con los resultados obtenidos y partir de la utilización de las fórmulas matemáticas corporativas se obtiene el valor del factor de seguridad.

En el presente trabajo no se muestra la metodología de cálculo para la obtención de estas variaciones ni para el caso del cálculo del factor de seguridad debido a términos de confidencialidad. Sin embargo, el presente Capítulo se enfoca en realizar un análisis comparativo de los datos obtenidos para el factor de seguridad previo y posterior a la implementación de las oportunidades de mejora, con el fin de evaluar si estas tuvieron un impacto en el valor del factor de seguridad obtenido posterior a su implementación.

Es importante mencionar previo al análisis de datos que la empresa cuenta con prensas de vulcanización que utilizan como medio de transferencia de calor gas nitrógeno y otras que utilizan agua, situación que implica el cálculo del factor de seguridad para ambos casos. Esta diferencia en el valor obtenido para cada caso radica en que algunas de las 7 variabilidades contempladas en la sumatoria dependen del tipo de fluido utilizado para el proceso de transferencia de calor. Cabe mencionar que el

Blow Point no corresponde a una de las variabilidades que se ve afectado por el tipo de fluido, sin embargo, al ser una sumatoria cualquiera de las variabilidades que sí varíen afectan el resultado final para la obtención del cálculo del factor de seguridad. Por otra parte, también se debe mencionar que en el análisis de resultados se comentará sobre llantas del tipo 1 y tipo 2, esto se debe a que la empresa también cuenta con tipos de llantas según sea el fin comercial, por lo tanto los Cuadros de resultados y gráficos elaborados presentarán los datos para ambos casos.

Ahora bien, iniciando con el análisis de los datos en el Cuadro 6.4 se presentan los resultados para el caso de la prensa que utiliza gas nitrógeno.

Cuadro 6.4. Cuadro comparativo de los resultados obtenidos para la variación del blow point, porcentaje de influencia del blow point, y factor de seguridad para los períodos 2019-2020 y 2020-2021 utilizando gas nitrógeno.

Dato	Periodo 2019-2020		Periodo 2020-2021	
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2
Variación del Blow Point, σ	0.375	0.375	0.173	0.173
Porcentaje de Influencia, %	18.73	17.95	4.14	4.33
Factor de seguridad, %	20	20	19	19

A partir de este Cuadro se puede observar que la variación del blow point pasó de tener un valor de **0.375** en el período 2019-2020 a **0.173** para el período 2020-2021 posterior a la aplicación de las oportunidades de mejora, lo cual indica que se logró la reducción de la variación en dicho factor.

También se puede evidenciar que se presentó una reducción en el porcentaje de influencia, que corresponde a la influencia que tiene cada una de las 7 variaciones sobre el cálculo del factor de seguridad. Como se puede observar hay 4 valores distintos. Lo anterior se debe a que de acuerdo al tipo de llanta utilizado para el cálculo de la variabilidad del Blow Point la sumatoria del factor de seguridad varía, y

por lo tanto el resultado final del mismo.

A continuación, se adjunta la Figura 6.9 en donde se evidencia de manera más clara los resultados obtenidos.

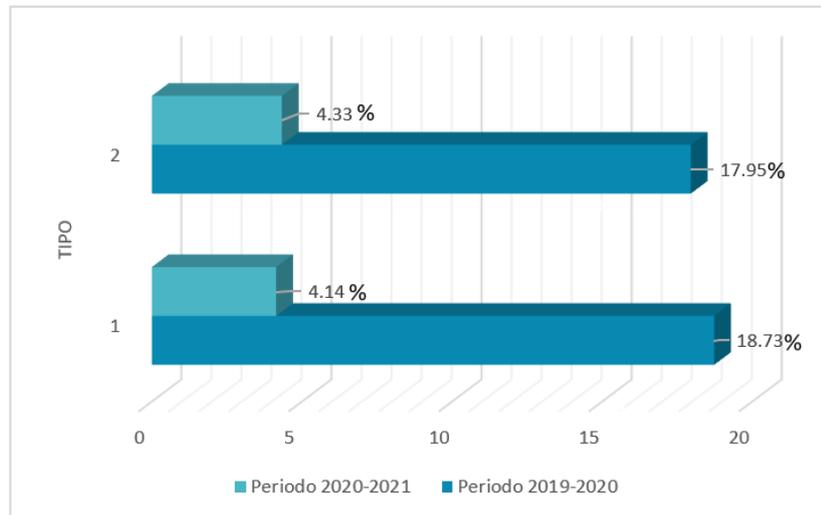


Figura 6.9. Gráfico del porcentaje de influencia del blow point para ambos tipos de llanta, en los periodos 2019-2020 y 2020-2021.

Como se puede observar se dió una disminución significativa de los porcentajes de influencia entre un período y el otro en ambos tipos de llantas, situación que se da como respuesta una disminución de la variación antes mencionada.

Para completar el análisis de datos utilizando gas nitrógeno, también se puede observar en el Cuadro 6.4 que se obtuvo una disminución del cálculo final del factor de seguridad, pasando de un **20 %** a un **19 %**. Lo cual representa una situación deseable en términos de producción ya que una reducción del factor de seguridad implica una disminución del tiempo total de vulcanización de la llanta, dando la posibilidad de un aumento en la capacidad de producción y una disminución de los costos.

Seguidamente, se realizó el mismo análisis de los datos pero esta vez para el caso del agua como medio de transferencia de calor. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 6.5.

Cuadro 6.5. Cuadro comparativo de los resultados obtenidos para la variación del blow point, porcentaje de influencia del blow point, y factor de seguridad para los períodos 2019-2020 y 2020-2021 utilizando agua.

Dato	Periodo 2019-2020		Periodo 2020-2021	
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2
Tipo de llanta				
Variación del Blow Point, σ	0.375	0.375	0.173	0.173
Porcentaje de Influencia, %	19.02	18.20	4.20	5.93
Factor de seguridad, %	19	19	17	17

La variación del Blow Point no cambia con respecto al caso anterior, ya que el cálculo aplicado sigue siendo el mismo independientemente del medio utilizado como transferencia de calor, como se mencionó anteriormente. Sin embargo en lo que respecta al porcentaje de influencia y al factor de seguridad sí hubo cambio en los datos obtenidos. En la Figura 6.10 al igual que en el caso anterior se evidencia de manera más clara los resultados obtenidos para el porcentaje de influencia en ambos tipos de llantas.

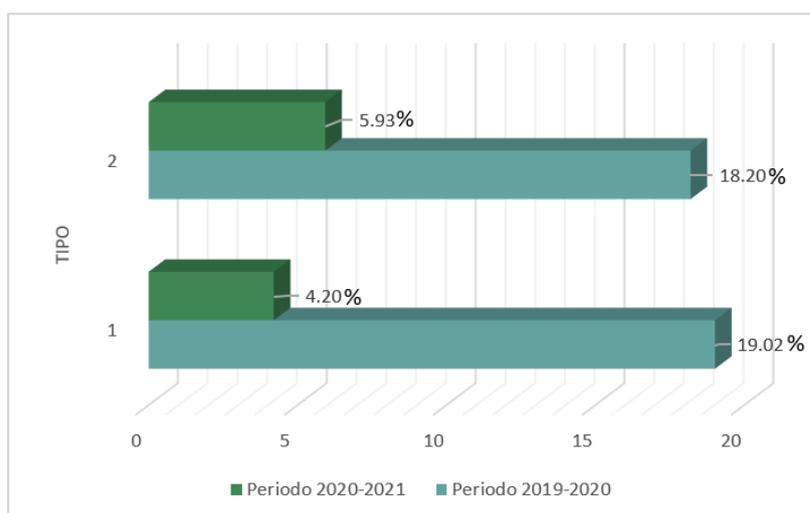


Figura 6.10. Gráfico del porcentaje de influencia del blow point para ambos tipos de llanta, en los períodos 2019-2020 y 2020-2021.

Nuevamente, se puede observar la disminución del porcentaje de influencia del factor del Blow Point en ambos tipos de llantas para los períodos contemplados. En el tipo

1 pasa de un valor de **18.20 %** a **5.93 %** y para el tipo 2 pasa de un valor de **19.02 %** a **4.20 %**.

En cuanto al factor de de seguridad según lo reflejado en el Cuadro 6.5 hubo una reducción del **2 %**.

Finalmente, se concluye con los resultados obtenidos de la aplicación de las oportunidades de mejora que no solo se logró obtener una reducción de la variabilidad en el Hule (H23) elegido como caso base por su mayor aporte de variación Figura 6.4, también hubo mejoras en la reducción de los valores obtenidos para el cálculo del factor de seguridad en cada caso, siendo este el resultado deseado del presente trabajo.

6.10. Documento entregable sobre las propuesta de oportunidades de mejora planteadas

Como último punto de ejecución para la finalización de esta práctica dirigida se procedió a elaborar y presentar un documento formal entregable para la empresa, en donde se detalló la situación sobre la problemática identificada durante la ejecución de la práctica dirigida, el análisis causa-raíz, las acciones a implementar, los recursos necesarios para la implementación de estas oportunidades de mejora, el análisis de resultados sobre la verificación y eficacia de implementar las oportunidades de mejora propuestas y el impacto en el negocio con la aplicación de estas oportunidades de mejora, sin embargo por cuestiones de confidencialidad no se encuentra adjunto en el documento

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

✓El Blow Point corresponde al segundo factor de variación con mayor contribución en el cálculo del factor de seguridad, representando un 19% de la variación total, por lo tanto, es necesario contemplar medidas que permitan controlar la variación asociada a este factor.

✓El hule H23 obtuvo la mayor desviación estándar y el mayor valor de capacidad del proceso, por lo cual se seleccionó como caso base de estudio para la búsqueda de oportunidades de mejora de la variación asociada al Blow Point.

✓Los 5 hules seleccionados para el estudio presentaron una distribución normal de los datos basado en el estadístico de Anderson-Darling, por esto fueron contemplados como casos de estudio para el análisis de los datos.

✓Los factores de mayor contribución a la variación en la medición del Blow Point son: conocimiento de los criterios para la lectura del poro, grosor de la muestra, doping del equipo y eliminación de aire en la muestra, por lo tanto, se concluye que es importante tener un seguimiento continuo en la ejecución del método.

✓El valor de incertidumbre expandida no es significativo según los valores obtenidos del Blow Point, por lo tanto, no se consideró como parte de la propuesta de oportunidades de mejora.

✓Para el análisis inicial de repetibilidad y reproducibilidad se obtuvo una variación total del proceso de 70.81% por lo cual el sistema de medición no es aceptable.

✓Del análisis de correlación lineal y no lineal se logró determinar que no existe nin-

gún tipo de correlación entre las variables de estudio seleccionadas.

✓ A partir de la aplicación de las oportunidades se mejoró la variación total del proceso a un 7.6 % por lo cual el sistema de medición pasó a ser aceptable.

✓ Se logró una reducción del factor de seguridad de 20 % al 19 % para prensas de vulcanización que utilizan gas nitrógeno y de 19 % a 17 % para prensas de vulcanización que utilizan agua, por lo tanto, se pudo observar que las oportunidades de mejora aplicadas fueron efectivas para la obtención de resultados deseados.

✓ Finalmente se concluye que con el análisis y la aplicación de las oportunidades de mejora realizadas en el presente trabajo se logró reducir la variabilidad en los resultados del factor de Blow Point para el cálculo del factor de seguridad utilizado en los ciclos de vulcanización.

Recomendaciones.

✓ Se recomienda una mejor capacitación de los operarios técnicos para la ejecución de la prueba. Por medio de reentrenamientos y evaluaciones (listas de chequeo) que permitan conocer los pasos necesarios a reforzar durante la ejecución del método.

✓ Se recomienda el uso permanente de la ayuda visual elaborada y con esto facilitar el criterio para la detección del poro.

✓ Se recomienda la actualización de la ayuda visual de los pesos por tipo de hule para la preparación de la muestra. Estos se deben de estar actualizando de manera anual con el registro histórico de la gravedad específica.

✓ Se recomienda realizar análisis de repetibilidad y reproducibilidad en dicho ensayo de manera periódica, con el fin de evaluar la variación en las mediciones de la

porosidad.

✓Se recomienda realizar un análisis de correlación entre el Blow Point y un método que permita determinar el grado de dispersión de azufre en el hule.

NOMENCLATURA

Acrónimos

<i>BCT</i>	Mejor Tiempo de Curado	adim
<i>BP</i>	Blow Point	adim
<i>CE</i>	Curado Equivalente	adim
<i>CEF</i>	Efecto de Curado	adim
<i>IT</i>	Instrucción de trabajo	adim
<i>MH</i>	Torque máximo	adim
<i>ML</i>	Torque mínimo	adim
<i>R&R</i>	Repetibilidad y Reproducibilidad	adim
<i>TC50</i>	Avance de la reacción al 50 %	adim
<i>TC90</i>	Avance de la reacción al 90 %	adim

Griegas

α	Nivel de significancia	adim
χ	Tiempo de seguridad	s
δ	Derivada	adim
κ	Constante de conductividad térmica	adim
μ	Incertidumbre	adim
ψ	Capacidad del proceso	adim
σ	Variación	adim
τ	Tiempo de prueba de poro	s
τ	Tolerancia	cm

Mayúsculas

\bar{R}	Rango promedio	adim
<i>A</i>	Área de transferencia	m ²
<i>E</i>	Energía de activación	$\frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$
<i>L</i>	Distancia del poro medida por la regla	cm
<i>N</i>	Incertidumbre estándar expandida	adim
<i>N</i>	Número de puntos de la curva	adim
<i>Q</i>	Calor transferido	J

R	Constante de los gases	$\frac{\text{kcal}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$
T	Temperatura	K
W	Grado de afectación sobre el curado equivalente	adim
X	Fuente de variación	adim

Minúsculas

d	Factor dependiente del número de réplicas	adim
m	Pendiente del modelo de regresión lineal	cm
n	Cantidad de veces que se realiza el ensayo	adim
p	Ponderación	adim
r	Índice de correlación	adim
t	Tiempo	s

Subíndices

1	Refiérase a la medición 1	adim
2	Refiérase a la medición 2	adim
a	Refiérase a activación	adim
h	Refiérase a cada tipo de hule	adim
i	Refiérase a cada valor	adim
ref	Refiérase a referencia	adim
rep	Refiérase a la repetibilidad del modelo de regresión lineal	adim
x	Refiérase a posición	m

BIBLIOGRAFÍA

- Arshad, M., Rasol, M., y Ahmad, M. (2003). Anderson darling and modified anderson darling tests for generalized pareto distribution. *Pakistan Journal of Applied Sciences*.
- Campos, E. (2020). Estadística descriptiva multivariante. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Cardona, C. y Restrepo, A. (s.f). Herramientas de control: lista de chequeo.
- Carrasquilla, A., Chacón, A., Núñez, K., Gómez, O., Valverde, J., y Guerrero, M. (2016). Simple and multiple regression: application in the prediction of natural variables related to microalgae growing process. *Tecnología en Marcha*.
- Castillo, M. (2017). Estandarización de procesos para el mejor funcionamiento administrativo de la empresa foto estudio proaÑo. *Pontificia Universidad Católica Del Ecuador Sede Ambato*.
- Dick, J. (1992). The optimal measurment and use of dynamic properties from the moving die reometer for rubber compound analysis. *Rubber Divison, American Chemical Society*.
- Engineering, A. (2015). Elastomers. *McGrawHill*.
- Estepa, C. (2008). Interpretación de los diagramas de dispersión por estudiantes de bachillerato. *Universidad de Jaén. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación*.
- Farina, B. y González, Y. (1998). Gestión estratégica de la calidad, herramientas: una aplicación en el campo sanitario. *Dialnet*.
- Farrel, P. y Rogers-Stewart, K. (2006). Comprehensive study of tests for normality and symmetry: extending the spiegelhalter test. *Journal of Statistical Computation and Simulation*.
- Faulk, B. (2017). Method of setting cure.

- Friedenthal, E. (2007). Tecnología básica del caucho. *Sociedad Latinoamericana de tecnología del caucho*.
- Gallor, J. (2019). Análisis de repetibilidad y reproducibilidad. *Universidad del Atlántico*.
- García, M. y Portocarrero, D. (2019). Metodologías y herramientas de calidad para el mejoramiento continuo en las organizaciones. *Universidad Santiago de Cali*.
- González, F. (2014). Herramientas de calidad y el trabajo en equipo para disminuir la reprobación escolar. *Conciencia tecnológica*.
- Gutierrez, H. y De la Vara, R. (2009). Estadística inferencial 1 para ingeniería y ciencias. *McGraw-Hill*.
- Hernández, M. (2012). Estimación de incertidumbres guía gum. *E-medida. Revista española de metrología*.
- Izar, J. y González, J. (2004). Las 7 herramientas básicas de la calidad. *Editorial Universitaria Potosina*.
- Joint, C. (2008). Evaluation of measurments. *JCGM/WG 1*.
- Kasner, A. y Meincke, A. (s.f). Porosity in rubber. *International Polymer Science and Technology*.
- Kondo, Y. (1993). Human motivation. *S.n.*
- Martínez, M. y Marí, M. (s.f). La distribución normal. *Universidad politécnica de Valencia*.
- Persson, S. (1994). Dispersion of carbon black. *Elsevier Applied Science Publishers Ltd*.
- Portuondo, Y. y Portuondo, J. (2010). La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad de los procesos de medición. *Universidad de Oriente*.
- Ramirez, J. (2006). Introduccion a la reologia de los alimentos. *Universidad del Valle*.

- Ramos, L. y Sánchez, S. (1999). Vulcanización y formulación de hules. *Limusa S.A.*
- Rojas, A. (2016). Control estadístico de procesos. *Universidad Pontificia Comillas.*
- Sezna, J. y Dick, J. (1991). The use of rheometers for process control. *Rubber Division, American Chemical Society.*
- Vinuesa, P. (2016). Correlación, teoría y práctica. *UNAM.*
- Wooluru, Y., Swan, D., y Nagesh, P. (2014). The process capability analysis - a tool for process performance measures and metrics - a case study.
- Yepes, U., Restrepo, S., Vásquez, D., y Correo, J. (2017). Efecto del sistema de vulcanización en la cinética de reacción. *Investigación en materiales de ingeniería.*

APÉNDICES

A. DATOS INTERMEDIOS

Cuadro A.1. Valores de desviación estándar y cálculo de la capacidad del proceso de los hules seleccionados por su impacto en el factor de seguridad.

Compuesto	Año de análisis					
	2018		2019		2020	
	σ	$\sigma XBCT$	σ	$\sigma XBCT$	σ	$\sigma XBCT$
H1	0.042	0.552	0.052	0.680	0.016	0.202
H4	0.059	0.415	0.054	0.376	0.013	0.089
H6	0.107	0.591	0.055	0.303	0.018	0.101
H7	0.073	0.512	0.066	0.465	0.076	0.535
H8	0.086	0.474	0.069	0.381	0.008	0.047
H9	0.065	0.356	0.062	0.342	0.027	0.148
H10	0.083	0.459	NA	NA	0.058	0.319
H37	0.052	0.288	0.059	0.327	0.017	0.093
H38	0.055	0.520	0.044	0.416	0.017	0.161
H16	NA	NA	NA	NA	0.091	0.332
H39	0.058	0.465	0.041	0.328	0.025	0.204
H19	0.069	0.652	0.091	0.860	0.028	0.269
H21	0.052	0.493	0.092	0.873	0.016	0.148
H23	0.065	0.522	0.113	0.902	0.021	0.170
H26	0.058	0.463	0.062	0.498	NA	NA
H40	0.063	0.507	NA	NA	0.020	NA
H29	0.087	0.692	NA	NA	0.062	0.498
H33	0.095	0.758	0.044	0.351	0.024	0.192
H35	0.054	0.430	0.044	0.351	0.000	0.000

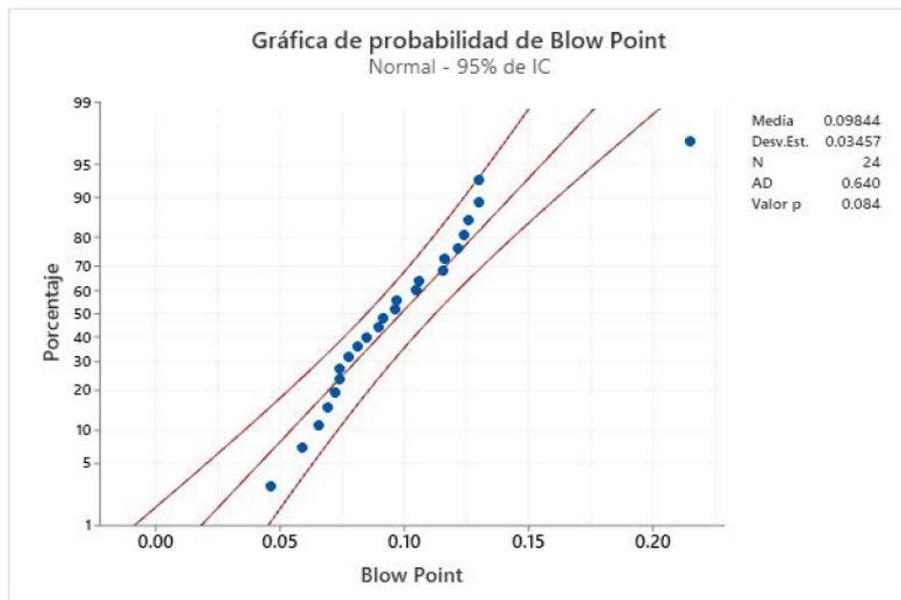


Figura A1. Gráfico de Normalidad de Blow Point para el hule H6.

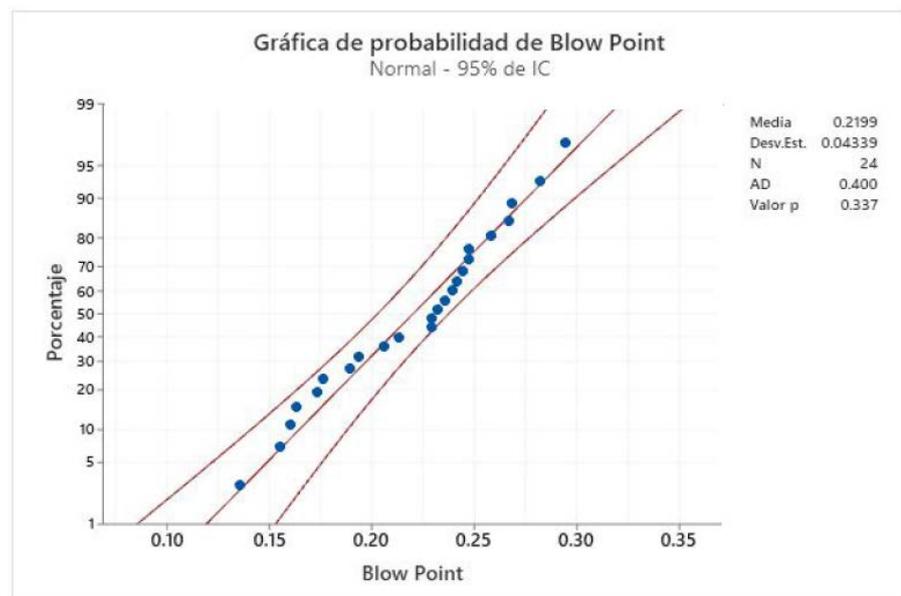


Figura A2. Gráfico de Normalidad de Blow Point para el hule H7.

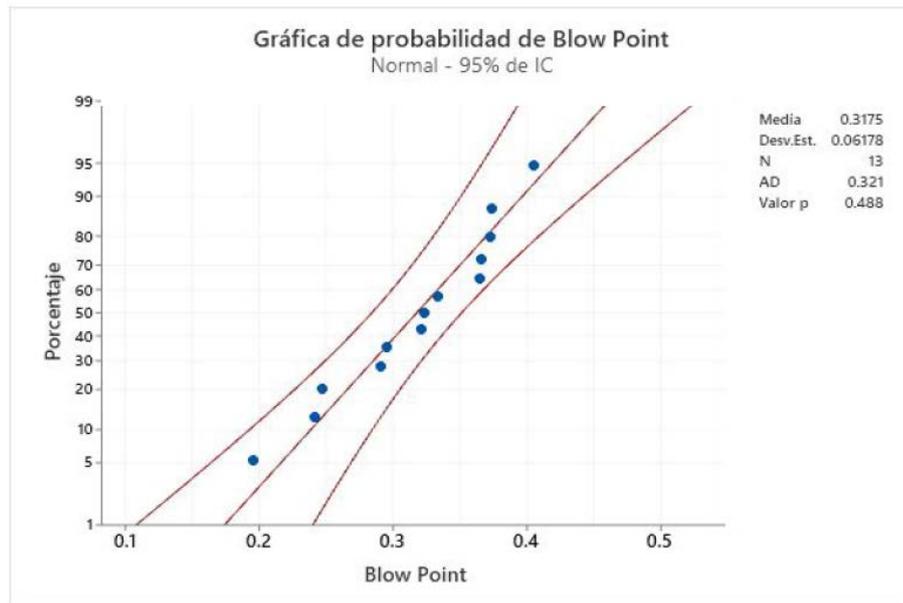


Figura A3. Gráfico de Normalidad de Blow Point para el hule H16.

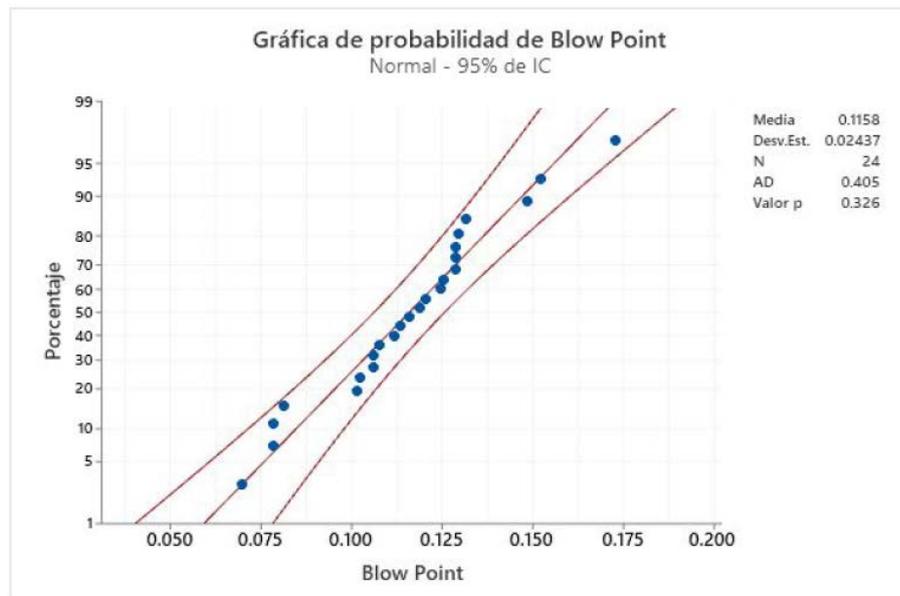


Figura A4. Gráfico de Normalidad de Blow Point para el hule H33.

Cuadro A.2. Datos utilizados para el cálculo de la desviación histórica como parte del análisis de incertidumbre.

Dato	$BP_{m1}, (adim)$	$BP_{m2}, (adim)$	Rango, (adim)
1	0.114	0.143	0.029
2	0.163	0.141	0.022
3	0.122	0.115	0.007
4	0.151	0.146	0.005
5	0.115	0.142	0.027
6	0.086	0.070	0.016
7	0.122	0.081	0.041
8	0.173	0.173	0.000
9	0.131	0.110	0.021
10	0.074	0.082	0.008

Cuadro A.3. Valores utilizados como parte de la determinación de incertidumbre mediante el uso del método numérico.

Dato	Datos de entrada		Método numérico		
	Blow Point, Y/(adim)	Distancia, X/(cm)	xi*yi	xi ²	p
	yi	xi			
1	0.348	0.20	0.07	0.04	1.23x10 ⁶
2	0.283	0.50	0.14	0.25	1.11x10 ⁷
3	0.212	0.80	0.17	0.64	9.18x10 ⁴
4	0.159	1.10	0.17	1.21	2.27x10 ⁵
Sumatoria	1.00	2.60	0.56	2.14	1.27x10 ⁷

Cuadro A.4. Valores utilizados como parte de la determinación de incertidumbre mediante el uso del método numérico.

Dato	Datos de entrada		Método numérico	
	Blow Point, Y/(adim)	Distancia, X/(cm)	p*yi	p*xi*yi
	p*xi	p*xi ²		
1	4.94x10 ⁴	2.47x10 ⁵	4.30x10 ⁵	8.59x10 ⁴
2	2.78x10 ⁶	5.56x10 ⁶	3.14x10 ⁶	1.57x10 ⁶
3	5.88x10 ⁴	7.35x10 ⁴	1.95x10 ⁴	1.56x10 ⁴
4	2.74x10 ⁵	2.49x10 ⁵	3.61x10 ⁴	3.97x10 ⁴
Sumatoria	3.16x10 ⁶	6.13x10 ⁶	3.63x10 ⁶	1.71x10 ⁶

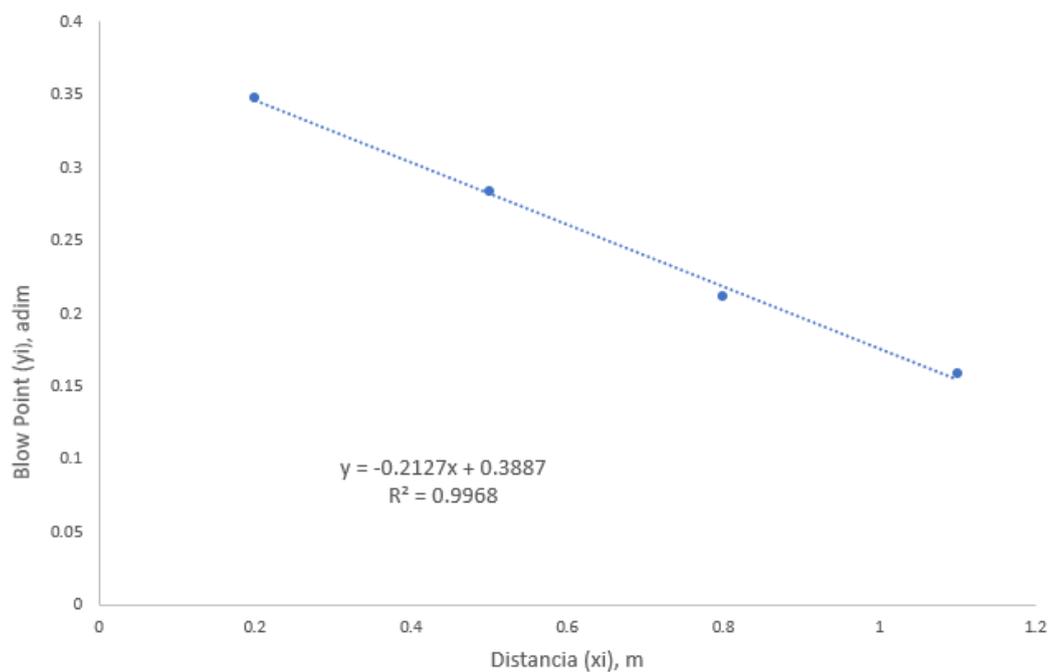


Figura A5. Gráfico de ajuste de regresión lineal para la determinación de la incertidumbre.

Cuadro A.5. Datos recolectados del operador 1 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad inicial del sistema de medición del blow point.

Parte	Medición			Referencia
	1	2	3	
H1	89.0	89.0	89.0	89.0
H5	62.0	62.0	62.0	39.0
H6	79.5	79.5	79.5	64.7
H7	95.0	95.0	95.0	95.3
H10	82.0	82.5	82.5	61.3
H11	79.5	79.0	79.0	79.0
H15	49.0	49.0	49.0	58.3
H23	79.5	79.5	79.5	79.7
H26	39.0	39.0	39.0	39.0
H33	63.0	63.0	63.0	71.3

Cuadro A.6. Datos recolectados del operador 2 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad inicial del sistema de medición del blow point.

Parte	Medición			Referencia
	1	2	3	
H1	45.0	45.0	45.0	89.0
H5	35.0	34.0	35.0	39.0
H6	58.5	58.0	57.5	64.7
H7	64.0	65.0	65.0	95.3
H10	40.0	40.0	40.0	61.3
H11	78.0	79.0	79.0	79.0
H15	35.0	35.0	35.0	58.3
H23	79.0	80.0	80.0	79.7
H26	39.0	39.0	38.0	39.0
H33	62.0	64.0	62.0	71.3

Cuadro A.7. Datos recolectados del operador 3 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad inicial del sistema de medición del blow point.

Parte	Medición			Referencia
	1	2	3	
H1	88.5	88.5	88.0	89.0
H5	41.5	42.0	38.0	39.0
H6	62.0	62.0	62.0	64.7
H7	100.5	100.1	97.5	95.3
H10	31.0	31.0	36.0	61.3
H11	79.0	78.0	79.0	79.0
H15	61.5	61.0	48.0	58.3
H23	79.0	79.0	79.5	79.7
H26	38.5	38.5	39.0	39.0
H33	88.0	62.0	62.0	71.3

Cuadro A.8. Cuadro ANOVA para el análisis de dos factores con interacción, con α para eliminar el término de interacción igual a 0,05.

Fuente	SC	MC	F	P-value
Parte	22300.1	2477.79	5.4443	0.001
Operador	4964.0	2482.00	5.4535	0.014
Parte*Operador	8192.1	455.12	44.9641	0.000
Repetibilidad	607.3	10.12	-	-
Total	36063.5	-	-	-

Cuadro A.9. Componentes de la varianza y su respectivo porcentaje de contribución al sistema de medición inicial del análisis R&R

Fuente	Componente de varianza	Porcentaje de Contribución (Componente de la Varianza), (%)
Estudio de R&R total	226.016	50.14
Repetibilidad	10.122	2.25
Reproducibilidad	215.894	47.90
Operadores	67.563	14.99
Operadores*Partes	148.332	32.91
Parte a parte	224.7471	49.86
Variación total	450.757	100.00

Cuadro A.10. Evaluación del sistema de medición inicial.

Fuente	Desviación estándar (DE)	Variabilidad del estudio (6*DE)	Porcentaje de variación, (%)
Estudio de R&R total	15.0338	90.203	70.81
Repetibilidad	3.1815	19.089	14.99
Reproducibilidad	14.6933	88.160	69.21
Operadores	8.2197	49.318	38.72
Operador*Parte	12.1791	73.075	57.36
Parte a parte	14.9914	89.948	70.61
Variación total	21.2310	127.386	100.00

Cuadro A.11. Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición inicial

S	Linealidad	R-Cuad, (%)	Linealidad, (%)
13.7073	23.8662	5.9	18.7

Cuadro A.12. Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición inicial.

Predictor	Coefficiente	EE del Coeficiente	P-value
Constante	8.395	5.583	0.136
Pendiente	-0.18735	0.07971	0.021

Cuadro A.13. Datos obtenidos para el sesgo del sistema de medición inicial

Referencia	Sesgo	Sesgo, (%)	P
39	3.2500	2.6	0.012
58.3	-11.3556	8.9	0.005
61.3	-9.6333	7.6	0.128
64.7	1.8000	1.4	0.475
71.3	-5.8556	4.6	0.076
79	-0.1667	0.1	0.339
79.7	-0.2556	0.2	0.050
89	-14.8889	11.7	0.017
95.3	-8.9556	7.0	0.058
Promedio	-4.2811	3.4	0.000

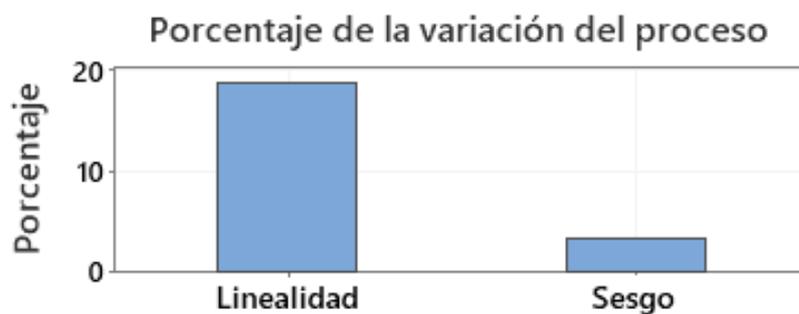


Figura A6. Gráfica de medición por operadores.

Cuadro A.14. Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y la dispersión de negro de humo para el hule H6.

Muestra	Porcentaje de Dispersión de Negro de Humo, (%)	Valores de Blow Point, (adim)
1	47.5	0.154
2	40.7	0.088
3	48.1	0.131
4	34.2	0.137
5	41.6	0.155
6	33.6	0.104
7	44.2	0.133
8	44.3	0.116
9	40.2	0.152
10	26.4	0.129
11	35.0	0.168
12	30.0	0.125
13	35.1	0.146
14	31.8	0.137
15	31.6	0.131

Cuadro A.15. Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y la dispersión de negro de humo para el hule H7.

Muestra	Porcentaje de Dispersión de Negro de Humo, (%)	Valores de Blow Point, (adim)
1	92.3	0.387
2	92.9	0.305
3	93.1	0.297
4	91.2	0.362
5	93.0	0.344
6	93.1	0.343
7	93.6	0.337
8	93.3	0.395
9	90.0	0.393
10	92.5	0.129
11	90.9	0.351
12	91.1	0.305
13	91.5	0.387
14	91.4	0.315
15	91.1	0.354

Cuadro A.16. Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y la dispersión de negro de humo para el hule H16.

Muestra	Porcentaje de Dispersión de Negro de Humo, (%)	Valores de Blow Point, (adim)
1	97.7	0.334
2	98.3	0.239
3	96.8	0.267
4	94.4	0.299
5	96.5	0.311
6	96.4	0.342
7	96.0	0.261
8	95.2	0.272
9	96.5	0.278
10	99.0	0.328
11	97.6	0.274
12	98.2	0.237
13	96.3	0.317
14	98.4	0.259
15	97.0	0.273

Cuadro A.17. Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y la dispersión de negro de humo para el hule H23.

Muestra	Porcentaje de Dispersión de Negro de Humo, (%)	Valores de Blow Point, (adim)
1	85.6	0.134
2	85.3	0.125
3	84.9	0.133
4	87.8	0.137
5	87.5	0.123
6	85.3	0.154
7	83.4	0.109
8	81.8	0.128
9	87.4	0.140
10	88.1	0.171
11	85.0	0.137
12	82.4	0.138
13	87.3	0.093
14	84.3	0.106
15	84.7	0.093

Cuadro A.18. Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y la dispersión de negro de humo para el hule H33.

Muestra	Porcentaje de Dispersión de Negro de Humo, (%)	Valores de Blow Point, (adim)
1	98.5	0.398
2	95.9	0.352
3	98.8	0.354
4	96.0	0.348
5	95.3	0.367
6	97.9	0.341
7	96.9	0.367
8	97.2	0.358
9	97.9	0.372
10	97.1	0.334
11	97.0	0.374
12	97.0	0.336
13	97.0	0.348
14	97.6	0.374
15	95.6	0.346

Cuadro A.19. Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y reometría a 433.15 K(160 °C) y 473.15 K(200 °C) para el hule H6.

Blow Point	433.15, (K)		473.15, (K)	
	TC50	TC90	TC50	TC90
0.154	3.90	9.53	0.49	0.80
0.088	3.90	9.53	0.49	0.79
0.131	3.93	9.54	0.49	0.80
0.115	3.93	9.54	0.49	0.79
0.155	3.90	9.53	0.49	0.80
0.104	3.91	9.53	0.49	0.80
0.133	3.97	9.58	0.49	0.80
0.116	3.94	9.55	0.49	0.80
0.152	3.90	9.53	0.49	0.79
0.129	3.90	9.53	0.49	0.80
0.168	3.89	9.51	0.49	0.80
0.125	3.89	9.51	0.49	0.80
0.146	3.91	9.53	0.49	0.79
0.137	3.98	9.60	0.49	0.80
0.131	3.98	9.60	0.49	0.80

Cuadro A.20. Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y reometría a 433.15 K(160 °C) y 473.15 K(200 °C) para el hule H7.

Blow Point	433.15, (K)		473.15, (K)	
	TC50	TC90	TC50	TC90
0.387	7.60	20.11	0.95	1.84
0.305	7.61	20.11	0.95	1.83
0.297	7.62	20.11	0.95	1.84
0.362	7.67	20.21	0.94	1.82
0.344	7.67	20.21	0.94	1.82
0.343	7.69	20.27	0.94	1.83
0.337	7.67	20.21	0.94	1.82
0.395	7.60	20.11	0.95	1.83
0.393	7.61	20.11	0.93	1.81
0.394	7.67	20.21	0.94	1.81
0.351	7.6	20.11	0.95	1.83
0.305	7.63	20.12	0.93	1.81
0.387	7.69	20.27	0.95	1.83
0.315	7.69	22.26	0.94	1.83
0.354	7.67	21.21	0.93	1.8

Cuadro A.21. Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y reometría a 433.15 K(160 °C) y 473.15 K(200 °C) para el hule H16.

Blow Point	433.15, (K)		473.15, (K)	
	TC50	TC90	TC50	TC90
0.334	6.10	12.71	0.72	1.19
0.239	6.10	12.71	0.72	1.19
0.267	6.20	12.71	0.70	1.17
0.299	6.26	12.79	0.70	1.18
0.311	6.32	12.87	0.72	1.19
0.342	6.11	12.71	0.71	1.18
0.261	6.15	12.72	0.70	1.17
0.272	6.26	12.79	0.69	1.17
0.278	6.1	12.71	0.71	1.19
0.328	6.15	12.72	0.71	1.18
0.274	6.33	12.87	0.70	1.17
0.237	6.27	12.79	0.71	1.18
0.317	6.11	12.71	0.70	1.18
0.259	6.12	12.71	0.70	1.18
0.273	6.15	12.72	0.70	1.18

Cuadro A.22. Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y reometría a 433.15 K(200 °C) y 473.15 K(200 °C) para el hule H23.

Blow Point	433.15, (K)		473.15, (K)	
	TC50	TC90	TC50	TC90
0.134	2.55	3.46	0.49	0.63
0.125	2.50	3.31	0.50	0.62
0.133	2.48	3.37	0.49	0.62
0.137	2.46	3.28	0.49	0.62
0.123	2.49	3.29	0.50	0.62
0.154	2.50	3.28	0.50	0.62
0.109	2.54	3.43	0.50	0.62
0.128	2.50	3.33	0.49	0.62
0.140	2.50	3.33	0.49	0.62
0.171	2.48	3.31	0.50	0.62
0.137	2.51	3.34	0.50	0.63
0.138	2.51	3.30	0.50	0.62
0.093	2.51	3.30	0.50	0.62
0.106	2.51	3.36	0.50	0.62
0.093	2.49	3.28	0.50	0.62

Cuadro A.23. Datos obtenidos para el análisis de correlación entre el ensayo de Blow Point y reometría a 433.15 K(160 °C) y 473.15 K(200 °C) para el hule H33.

Blow Point	433.15, (K)		473.15, (K)	
	TC50	TC90	TC50	TC90
0.398	2.57	4.93	0.65	1.13
0.352	2.05	4.63	0.64	1.11
0.354	2.46	4.74	0.65	1.11
0.348	2.24	4.66	0.65	1.13
0.367	2.18	4.86	0.65	1.12
0.341	1.77	4.53	0.66	1.14
0.367	2.24	4.67	0.65	1.11
0.358	2.03	4.68	0.65	1.12
0.372	2.31	4.93	0.64	1.11
0.334	2.2	4.67	0.66	1.14
0.374	2.07	4.72	0.65	1.11
0.336	2.14	4.61	0.65	1.12
0.348	2.02	4.6	0.65	1.12
0.374	2.16	4.71	0.66	1.13
0.347	2.27	4.88	0.65	1.12

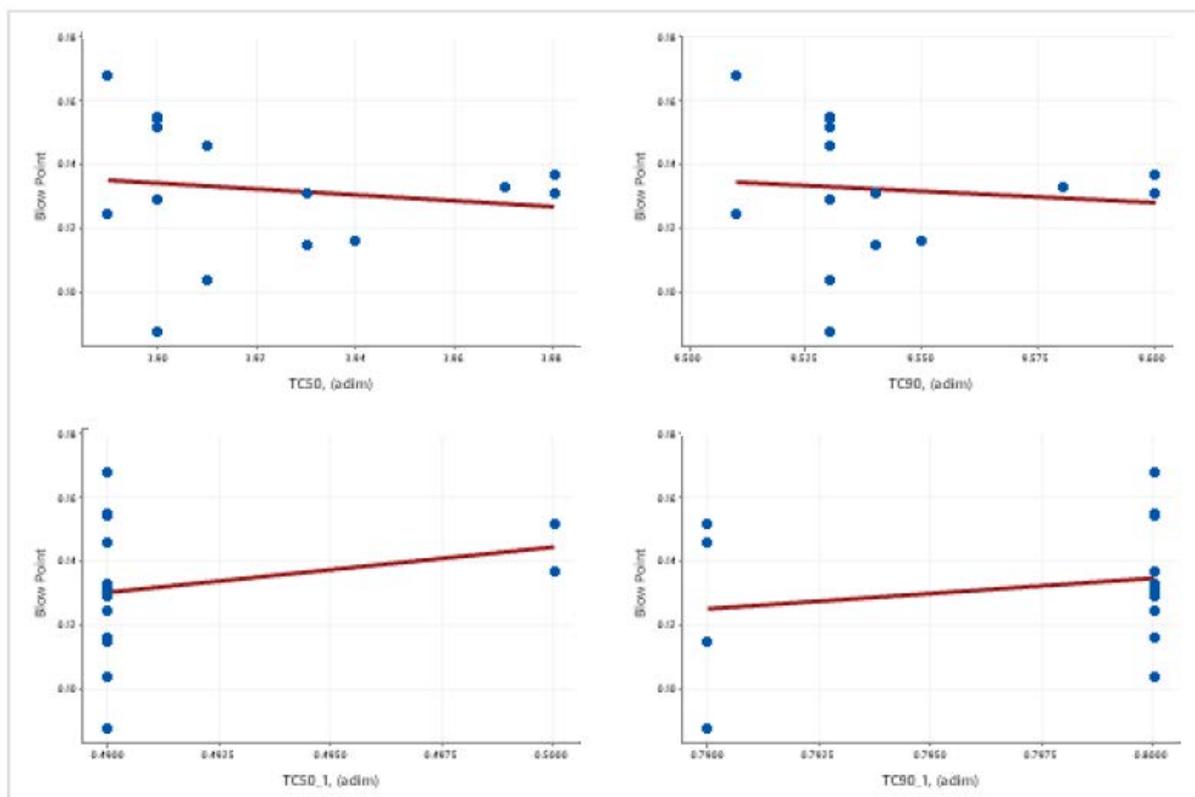


Figura A7. Gráficas de correlación lineal entre el Blow point y el ensayo de reometría para el hule en estudio H6.

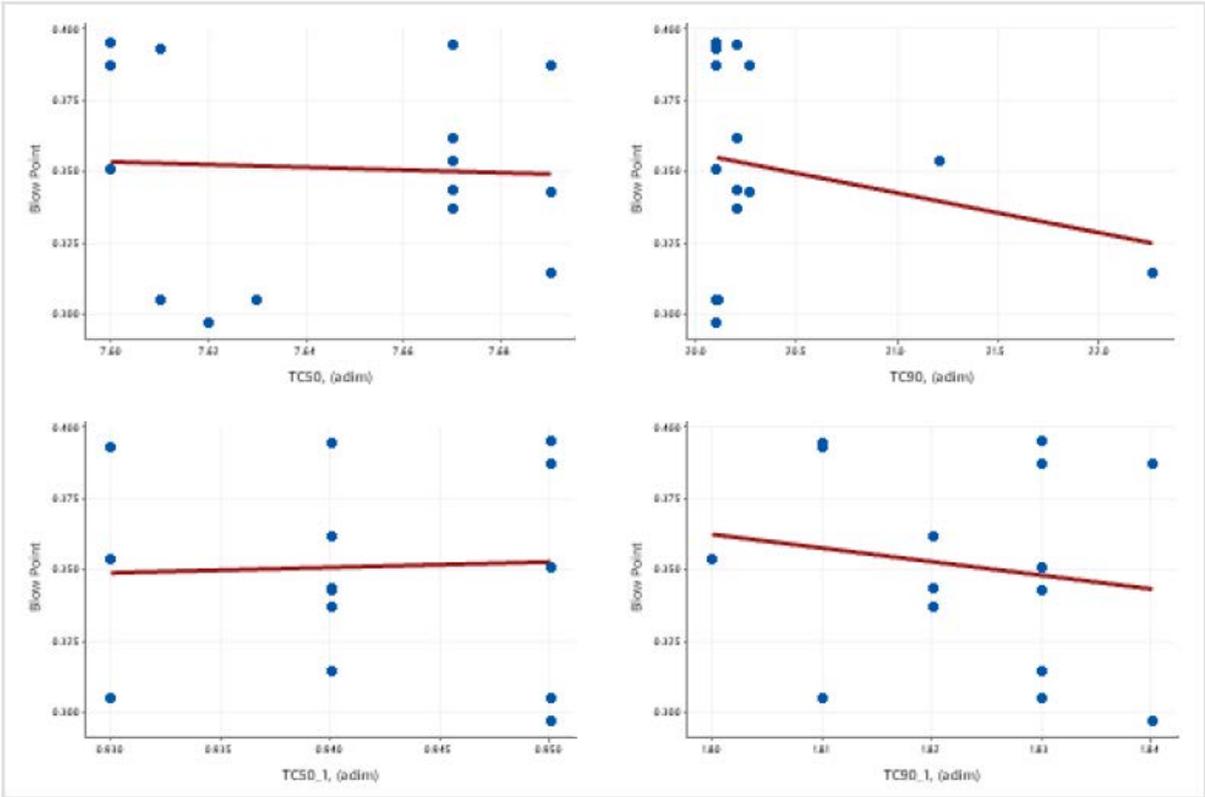


Figura A8. Gráficas de correlación lineal entre el Blow point y el ensayo de reometría para el hule en estudio H7.

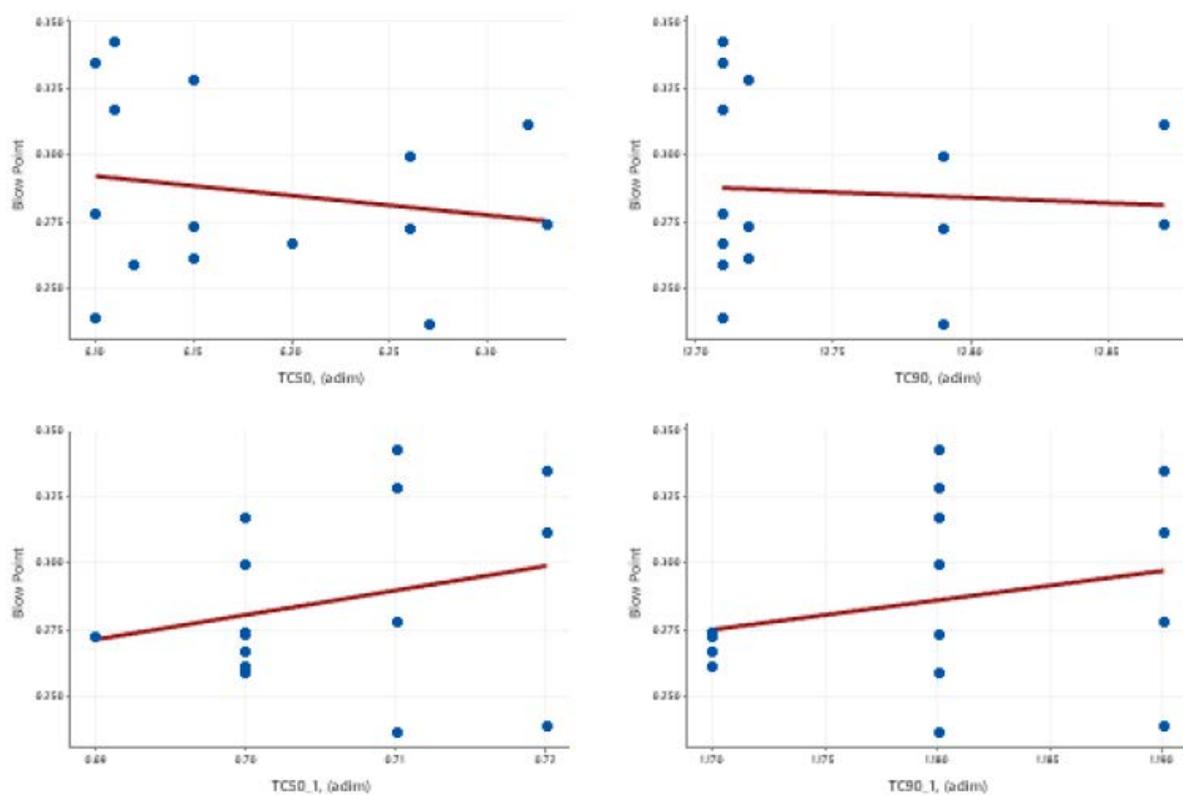


Figura A9. Gráficas de correlación lineal entre el Blow point y el ensayo de reometría para el hule en estudio H17.

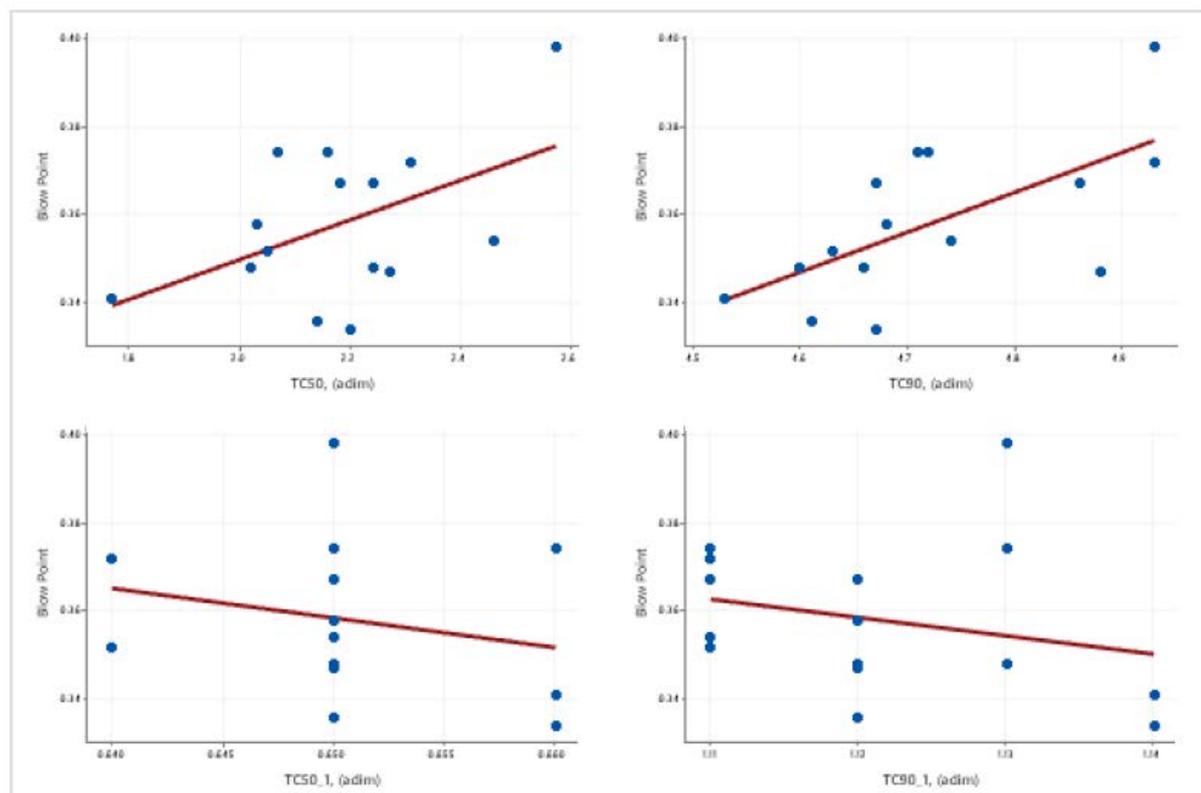


Figura A10. Gráficas de correlación lineal entre el Blow point y el ensayo de reometría para el hule en estudio H33.

Cuadro A.24. Valores de R-cuadrado obtenidos para los hules seleccionados de estudio como parte del análisis de correlación entre Blow Point y reometría, para la temperaturas de 433.15 K y 473.15 K

Tipo de Hule	Valor R-cuadrado			
	433.15 K		473.15 K	
	TC50	TC90	TC50	TC90
H6	0.019	0.009	0.043	0.055
H7	0.003	0.056	0.002	0.026
H17	0.033	0.005	0.062	0.061
H33	0.246	0.415	0.053	0.064

Cuadro A.25. Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y reometría para el hule H6, haciendo uso de Minitab.

Variable de estudio	Modelo de correlación lineal
TC50 (433.15 K)	Blow Point = $0.4925 - 0.0919 * TC50$
TC90 (433.15 K)	Blow Point = $0.0809 - 0.0709 * TC90$
TC50 (473.15 K)	Blow Point = $-0.5613 + 1.412 * TC50$
TC90 (473.15 K)	Blow Point = $-0.6303 + 0.957 * TC90$

Cuadro A.26. Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y reometría para el hule H7, haciendo uso de Minitab.

Variable de estudio	Modelo de correlación lineal
TC50 (433.15 K)	Blow Point = $0.715 - 0.0476 * TC50$
TC90 (433.15 K)	Blow Point = $0.6352 - 0.01394 * TC90$
TC50 (473.15 K)	Blow Point = $0.170 + 0.193 * TC50$
TC90 (473.15 K)	Blow Point = $1.222 - 0.4776 * TC90$

Cuadro A.27. Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y reometría para el hule H17, haciendo uso de Minitab.

Variable de estudio	Modelo de correlación lineal
TC50 (433.15 K)	Blow Point = $0.7374-0.0730*TC50$
TC90 (433.15 K)	Blow Point = $0.801-0.0404*TC90$
TC50 (473.15 K)	Blow Point = $-0.3615+0.9172*TC50$
TC90 (473.15 K)	Blow Point = $-1.012+1.100*TC90$

Cuadro A.28. Modelos de correlación lineal obtenidos del análisis de datos de Blow Point y reometría para el hule H33, haciendo uso de Minitab.

Variable de estudio	Modelo de correlación lineal
TC50 (433.15 K)	Blow Point = $0.2601+0.04492*TC50$
TC90 (433.15 K)	Blow Point = $-0.0671+0.09005*TC90$
TC50 (473.15 K)	Blow Point = $0.7932-0.6689*TC50$
TC90 (473.15 K)	Blow Point = $0.8213-0.4131*TC90$

Cuadro A.29. Matriz de de correlación no lineal obtenida a partir del software JMP para el caso del hule H6.

	Blow Point	TC50 (433.15 K)	TC90 (433.15 K)	TC50 (473.15 K)	TC90 (473.15 K)
Blow Point	1.0000	-0.1386	-0.0953	0.0000	0.2072
TC50 (433.15 K)	-0.1386	1.0000	0.9715	0.1518	0.2349
TC90 (433.15 K)	-0.0953	0.9715	1.0000	0.4213	0.2234
TC50 (473.15 K)	0.0270	0.3112	0.1543	1.0000	0.3125
TC90 (473.15 K)	0.2072	0.2349	0.2234	0.0812	1.0000

Cuadro A.30. Matriz de de correlación no lineal obtenida a partir del software JMP para el caso del hule H7.

	Blow Point	TC50 (433.15 K)	TC90 (433.15 K)	TC50 (473.15 K)	TC90 (473.15 K)
Blow Point	1.0000	0.0497	-0.2357	0.0428	-0.1609
TC50 (433.15 K)	-0.0497	1.0000	0.4808	-0.3242	-0.2671
TC90 (433.15 K)	-0.2357	0.4808	1.0000	-0.2730	0.1203
TC50 (473.15 K)	0.0428	0.3242	-0.2730	1.0000	0.8632
TC90 (473.15 K)	-0.1609	-0.2671	-0.1203	0.8632	1.0000

Cuadro A.31. Matriz de de correlación no lineal obtenida a partir del software JMP para el caso del hule H17.

	Blow Point	TC50 (433.15 K)	TC90 (433.15 K)	TC50 (473.15 K)	TC90 (473.15 K)
Blow Point	1.0000	-0.1821	-0.0699	0.2481	0.2471
TC50 (433. 15K)	-0.1821	1.0000	0.9397	-0.2131	0.3602
TC90 (433.15 K)	-0.0699	0.9397	1.0000	0.0323	-0.1460
TC50 (473.15 K)	0.2481	0.2131	-0.0323	1.0000	0.8305
TC90 (473.15 k)	0.2471	0.3602	0.1460	0.8305	1.0000

Cuadro A.32. Matriz de de correlación no lineal obtenida a partir del software JMP para el caso del hule H33.

	Blow Point	TC50 (433.15 K)	TC90 (433.15 K)	TC50 (473.15 K)	TC90 (473.15 K)
Blow Point	1.0000	0.4956	0.6445	-0.2295	-0.2531
TC50 (433.15 K)	0.4956	1.0000	0.7279	-0.2588	-0.2052
TC90 (433.15 K)	0.6445	0.7279	1.0000	-0.3607	-0.2354
TC50 (473.15 k)	0.2295	0.2588	-0.3607	1.0000	0.7794
TC90 (473.15 k)	0.2531	0.2052	0.2354	0.7794	1.0000

Cuadro A.33. Datos recolectados del operador 1 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad final del sistema de medición del blow point.

Parte	Medición			Referencia
	1	2	3	
H1	45.0	44.5	45.0	44.0
H5	38.0	38.0	38.0	25.3
H6	57.0	57.0	57.0	58
H7	30.0	30.0	30	31.0
H10	36.0	36.0	36.0	36.0
H11	79.0	79.0	79.0	79.0
H15	35.0	35.0	35.0	35.0
H23	79.0	79.0	79.0	79.0
H26	39.0	38.5	39.0	39.0
H33	62.0	62.0	62.0	63.0

Cuadro A.34. Datos recolectados del operador 2 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad final del sistema de medición del blow point.

Parte	Medición			Referencia
	1	2	3	
H1	49.0	49.0	50.0	44.0
H5	35.0	35.0	35.0	25.3
H6	62.0	62.0	62.0	58.0
H7	30.0	30.0	30	31.0
H10	36.0	36.0	36.0	36.0
H11	79.0	79.0	79.0	79.0
H15	35.0	35.0	35.0	35.0
H23	79.0	79.0	79.0	79.0
H26	39.0	38.5	39.0	39.0
H33	62.0	62.0	62.0	63.0

Cuadro A.35. Datos recolectados del operador 3 para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad final del sistema de medición del blow point.

Parte	Medición			Referencia
	1	2	3	
H1	45.0	44.5	44.5	44.0
H5	38.0	38.0	38.0	25.3
H6	62.0	62.0	62.0	58.0
H7	30.0	30.0	30	31.0
H10	36.0	36.0	37.0	36.0
H11	78.5	78.5	78.0	79.0
H15	34.5	35.0	35.0	35.0
H23	79.0	79.0	79.0	79.0
H26	38.5	38.5	38.5	39.0
H33	62.0	62.0	62.5	63.0

Cuadro A.36. Cuadro ANOVA para el análisis R&R final de dos factores con interacción, con α para eliminar el término de interacción igual a 0,05.

Fuente	SC	MC	F	P-value
Parte	27427.1	3047.46	531.018	0.000
Operador	6.8	3.38	0.589	0.565
Parte*Operador	103.3	5.74	137.733	0.000
Repetibilidad	2.5	0.04	-	-
Total	27539.7	-	-	-

Cuadro A.37. Componentes de la varianza y su respectivo porcentaje de contribución al sistema de medición final del análisis R&R

Fuente	Componente de varianza	Porcentaje de Contribución (Componente de la Varianza), (%)
Estudio de R&R total	1.941	0.57
Repetibilidad	0.042	0.01
Reproducibilidad	1.899	0.56
Operador	0.000	0.00
Operador*Partes	1.899	0.56
Parte a parte	337.969	99.43
Variación total	339.909	100.00

Cuadro A.38. Evaluación del sistema de medición final.

Fuente	Desviación estándar (DE)	Variabilidad del estudio (6*DE)	Porcentaje de variación, (%)
Estudio de R&R total	1.3931	8.359	7.56
Repetibilidad	0.2041	1.225	1.11
Reproducibilidad	1.3781	8.268	7.47
Operador	0.0000	0.000	0.00
Operador*Parte	1.3781	8.268	7.47
Parte a parte	18.3839	110.304	99.71
Variación total	18.4366	110.220	100.00

Cuadro A.39. Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición final.

S	Linealidad	R-Cuad,(%)	Linealidad,(%)
3.51991	8.53939	14.5	7.7

Cuadro A.40. Datos obtenidos para la linealidad del sistema de medición final.

Predictor	Coefficiente	EE del Coeficiente	Valor P
Constante	5.166	1.045	0.000
Pendiente	-0.07720	0.01997	0.0000

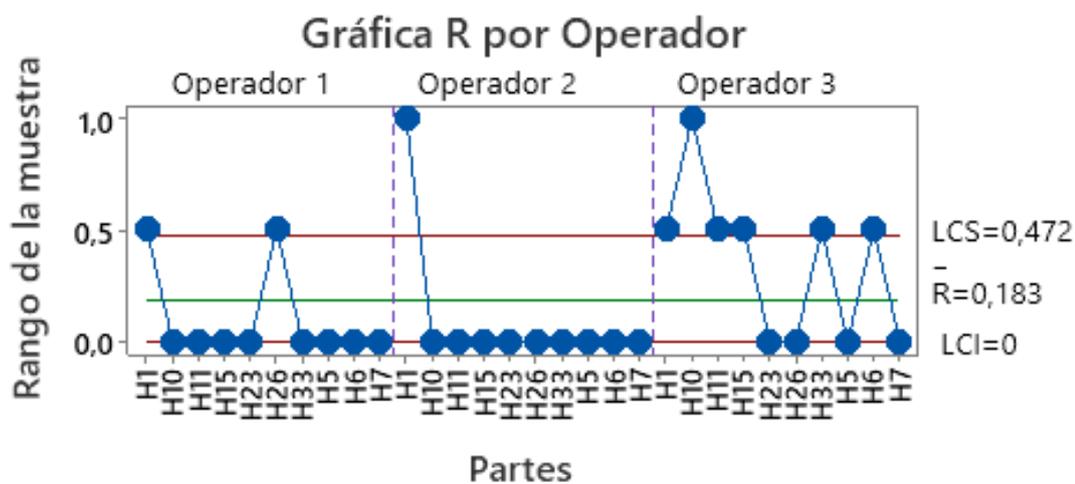


Figura A11. Gráfico R por operador para el análisis R&R final.

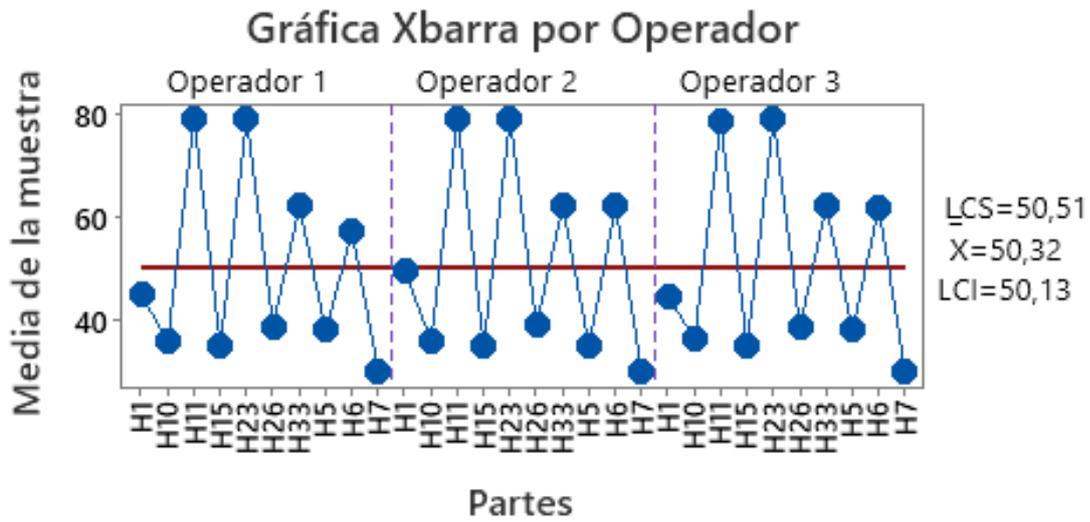


Figura A12. Gráfico Xbarra por operador para el análisis R&R final.

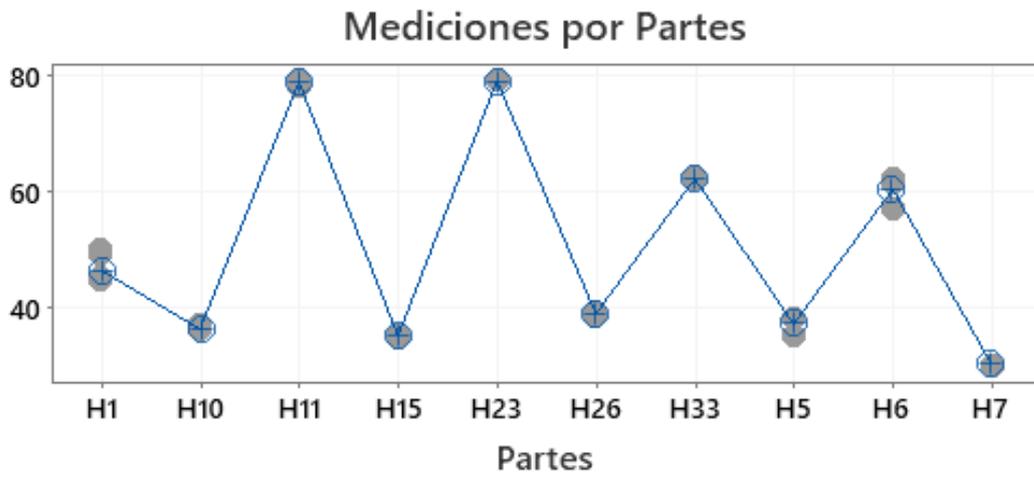


Figura A13. Gráfico de Medición por parte para el análisis R&R final.

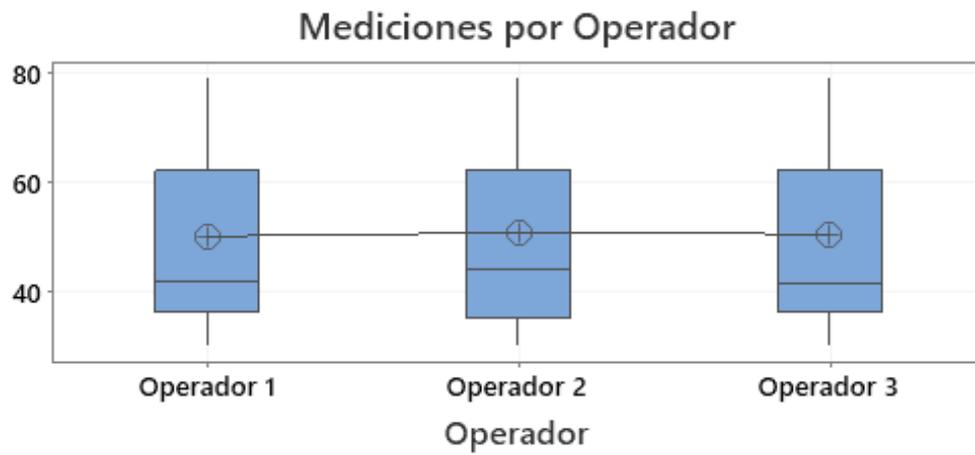


Figura A14. Gráfico de Medición por Operador para el análisis R&R final.

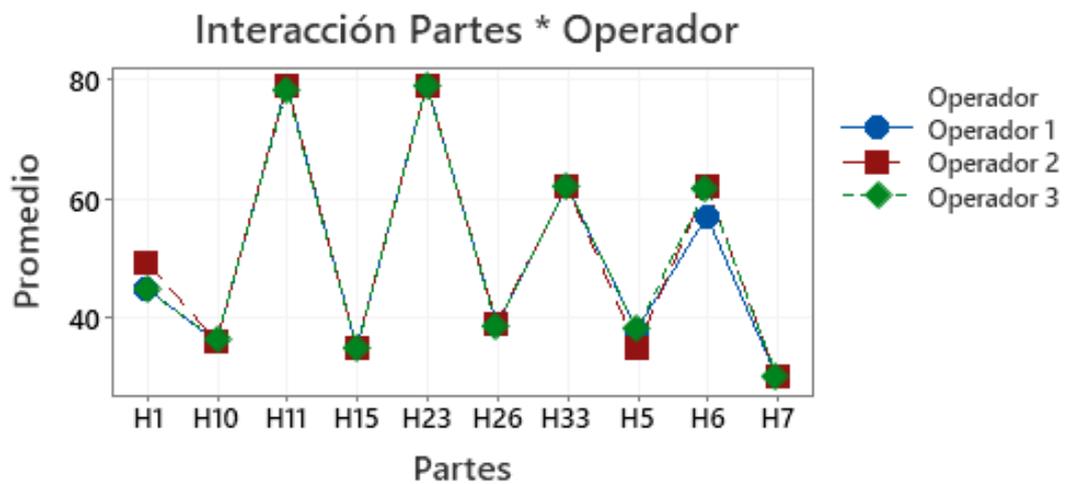


Figura A15. Gráfico de Interacción Partes por Operador para el análisis R&R final.

Laboratorio Químico				
Lista de Chequeo para la estandarización del método de medición del Blow Point				
Nombre del Proceso:		Nombre empleado :		Materia prima utilizada:
Instrucciones: Llene la casilla correspondiente a la clasificación al otorgar un "✓" según su criterio de aprobación para el ítem correspondiente. Nota: Los ítems que cuenten con un "***" corresponden a instrucciones que no se encuentran directamente explícitas en la práctica estándar (BL005) o en la instrucción de trabajo.				
Categoría	Clasificación			Observaciones
	Sí	No	N.A	
A. Preparación de la muestra				
La muestra es molienda hasta obtener una banda lisa.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
La muestra es molienda hasta obtener el grosor necesario de la banda lisa.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
El molino utilizado recibe mantenimiento.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se tiene conocimiento sobre el ajuste del grosor del molino con el que se debe de molinear la muestra.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se tiene conocimiento que el hule no debe de ser moliendo superior a 5 veces (esto se ejecuta con el fin de ajustar el grosor y tamaño de la banda lisa que se está preparando).*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Toda la banda lisa presenta el mismo grosor.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se cuenta con un dimensionamiento estándar de las muestras (molde).*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
El molde cuenta con las dimensiones establecidas en la práctica estándar (138 ± 1 x 53 ± 1 x 9-12 ± 1) mm.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
La muestra es pesada en la balanza granataria para verificar que cuente con el peso establecido según la práctica estándar (en un a rango de [70-75] g).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Si la muestra no cumple con el rango de peso estipulado, su peso es ajustado mediante alguna de las siguientes situaciones: 1. Si el peso es inferior, se agrega un segmento del mismo material moliendo en la sección de la muestra con mayor grosor, usualmente quedando posterior a la posición donde se inserta la cuarta termocupla. 2. Si el peso es superior se recorta un borde del material a lo largo de la sección lateral de la muestra.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Una vez que la muestra cumple con las condiciones de dimensionamiento y peso a esta se le elimina el aire atrapado haciendo uso de un punzón.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se preparan 2 muestras para cada hule.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ambas muestras preparadas para cada tipo de hule presentan las mismas condiciones (grosor, dimensionamiento, peso, eliminación de aire atrapado, etc)*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Las muestras son debidamente identificadas previo a su análisis.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
En el caso de que las muestras preparadas no sean vulcanizadas el mismo día, estas se envuelven en polietileno y se almacenan a 25 ± 5 para ser analizadas dentro de los 3 días posteriores.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Los pasos ejecutados para la preparación de la muestra se siguen en el orden en que se encuentran estipulados en la práctica estándar *	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se tiene total claridad de la manera en que se deben ejecutar los pasos anteriormente mencionados.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
B. Preparación del módulo				

Figura A16. Extracto de la lista de verificación elaborada como parte de la ejecución de la práctica.



Ayuda Visual AV-XXX-XX
 Revisión 0 Fecha de Emisión: dd/mm/yyyy
 Fecha de Revisión: dd/mm/yyyy
 Dept Emisor:
 Autor :

Figura A17. Caso 1: Poro con secuencia.



Ayuda Visual AV-XXX-XX
 Revisión 0 Fecha de Emisión: dd/mm/yyyy
 Fecha de Revisión: dd/mm/yyyy
 Dept Emisor:
 Autor :

Figura A18. Caso 2: Poro grande con tendencia.



Ayuda Visual AV-XXX-XX
 Revisión 0 Fecha de Emisión: dd/mm/yyyy
 Fecha de Revisión: dd/mm/yyyy
 Dept Emisor:
 Autor :

Figura A19. Caso 3: Aleatoriedad de poro.



Ayuda Visual AV-XXX-XX
 Revisión 0 Fecha de Emisión: dd/mm/yyyy
 Fecha de Revisión: dd/mm/yyyy
 Dept Emisor:
 Autor :

Figura A20. Caso 4: Poro aislado con secuencia.



Ayuda Visual AV-XXX-XX
 Revisión 0 Fecha de Emisión: dd/mm/yyyy
 Fecha de Revisión: dd/mm/yyyy
 Dept Emisor:
 Autor :

Figura A21. Caso 5: Afloramiento.



Ayuda Visual AV-XXX-XX
 Revisión 0 Fecha de Emisión: dd/mm/yyyy
 Fecha de Revisión: dd/mm/yyyy
 Dept Emisor:
 Autor :

Figura A22. Caso 6: Aglomeración de poros.



Ayuda Visual AV-XXX-XX
 Revisión 0 Fecha de Emisión: dd/mm/yyyy
 Fecha de Revisión: dd/mm/yyyy
 Dept Emisor:
 Autor :

Figura A23. Caso 7: Poro aislado sin tendencia posterior.



Ayuda Visual AV-XXX-XX
 Revisión 0 Fecha de Emisión: dd/mm/yyyy
 Fecha de Revisión: dd/mm/yyyy
 Dept Emisor:
 Autor :

Figura A24. Caso 8: Separación de caras.

Caso 9: Porosidad cerca de la superficie



Situación: Porosidad detectada cerca de la superficie. Cualquier burbuja que aparezca a 1 mm de la superficie de la muestra analizada no se contempla como porosidad.

Contramida:

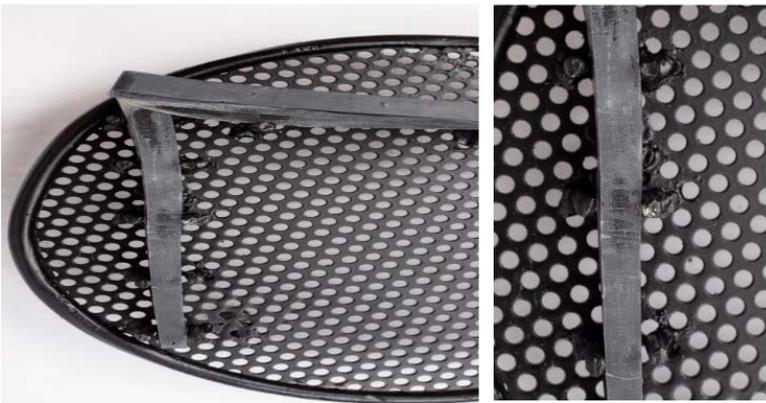
1. Aplicar dope al molde y separar la muestra del mismo con cuidado.
2. Stichear la muestra antes de vulcanizar.
3. Incrementar el peso de la muestra en 5g en el extremo más grueso de la cuña.



Ayuda Visual AV-XXX-XX
 Revisión 0 Fecha de Emisión: dd/mm/yyyy
 Fecha de Revisión: dd/mm/yyyy
 Dept Emisor:
 Autor :

Figura A25. Caso 9: Porosidad cerca de la superficie.

Caso 10: Sobrecurado



Situación: No se detecta porosidad en la muestra de hule analizado.

Contramida: Se debe disminuir el CE con el que se ejecutó la prueba para la muestra en cuestión.



Ayuda Visual AV-XXX-XX
 Revisión 0 Fecha de Emisión: dd/mm/yyyy
 Fecha de Revisión: dd/mm/yyyy
 Dept Emisor:
 Autor :

Figura A26. Caso 10: Sobrecurado.

B. MUESTRA DE CÁLCULOS

Cálculo del método numérico considerando la incertidumbre

Los coeficientes de la curva en un ajuste lineal se pueden determinar mediante las siguientes ecuaciones:

- Determinación de la pendiente

$$m = \frac{N \sum (x_i * y_i) - \sum y_i \sum x_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (30)$$

Los datos utilizados se encuentran en la fila 5 de las columnas 2,3,4 y 5 del Cuadro A.3. El valor de N utilizado en la fórmula representa la cantidad de puntos de la curva, de esta manera sustituyendo los valores se obtiene el siguiente resultado:

$$m = \frac{4 * 0,56 - 1,00 * 2,60}{4 * (2,60)^2 - (2,60)^2} \quad (31)$$

$$m = -0,21267m^{-1} \quad (32)$$

- Incertidumbre asociada a la pendiente (μ_m)

$$\mu_m^2 = \frac{\sum p}{\sum p \sum p.x_i^2 - (\sum p.x_i)^2} \quad (33)$$

Los datos utilizados se encuentran en la fila 5, columna 6 del Cuadro A.3 y en la fila 5, columnas 2 y 3 del Cuadro A.4. Sustituyendo los valores se obtiene el siguiente resultado.

$$\mu_m^2 = \frac{1,27x10^7}{1,27x10^7 * 3,16x10^6 - (6,13x10^6)^2} = 5,06x10^{-6}m^{-1} \quad (34)$$

Aplicando raíz cuadrada:

$$\mu_m = \sqrt{5,06x10^{-6}} = 2,25x10^{-3}m^{-1} \quad (35)$$

- Determinación del intercepto

$$CE = \frac{\sum yi \sum xi^2 - \sum xi \sum xi * yi}{N \sum xi^2 - (\sum xi)^2} \quad (36)$$

Los datos utilizados se encuentran en la fila 5, columnas 2,3,4 y 5 del Cuadro A.3. El valor de N utilizado en la fórmula representa la cantidad de puntos de la curva, de esta manera sustituyendo los valores se obtiene el siguiente resultado:

$$CE = \frac{1,00 * 2,60^2 - (2,60 * 0,56)}{4 * 2,60^2 - (2,60)^2} \quad (37)$$

$$CE = 0,38873adim. \quad (38)$$

- Incertidumbre asociada al Intercepto (μ_{CE})

$$\mu_{(CE)^2} = \frac{\sum p.xi^2}{\sum p \sum p.xi^2 - (\sum p.xi)^2} \quad (39)$$

Los datos utilizados se encuentran en la fila 5, columna 6 del Cuadro A.3 y en la fila 5, columnas 2 y 3 del Cuadro A.4. Sustituyendo los valores se obtiene el siguiente resultado.

$$\mu_{(CE)^2} = \frac{3,16x10^6}{1,27x10^7 * 3,16x10^6 - (6,13x10^6)^2} = 1,26x10^{-6}adim \quad (40)$$

Aplicando raíz cuadrada:

$$\mu_{(CE)} = \sqrt{\mu(1,26 \times 10^{-6})^2} = 1,12 \times 10^{-3} \text{adim} \quad (41)$$

- Incertidumbre asociada a la longitud (μ_L)

Para el caso de la incertidumbre asociada a la regla se utilizó el dato de tolerancia que se brinda en el certificado de calibración adjunto en el documento.

$$\mu_L = \frac{\tau}{\sqrt{3}} \quad (42)$$

$$\mu_L = \frac{0,05 \text{cm}}{\sqrt{3}} = 2,89 \times 10^{-2} \text{cm}. \quad (43)$$

- Incertidumbre asociada a la repetibilidad (μ_{rep})

Para la repetibilidad se utilizaron los registros históricos brindados por la empresa, los valores utilizados se encuentran en el Cuadro A.2. La metodología de cálculo fue la siguiente:

Primero se calculó cada uno de los rangos por medición. Donde BP_{m1} y BP_{m2} corresponden a los valores de Blow point obtenidos para cada réplica de la medición.

$$R = ABS(BP_{m1} - BP_{m2}) \quad (44)$$

$$R = ABS(0,114 - 0,143) \quad (45)$$

$$R = 0,029 \text{adim} \quad (46)$$

Seguidamente, se obtuvo el \bar{R} que corresponde al rango promedio obtenido de cada una de las diferencias entre rangos calculadas.

$$\bar{R} = 0,0166adim \quad (47)$$

Una vez obtenido este rango promedio se procedió a calcular la desviación histórica, tal y como se había comentado en el Capítulo 4 en la sección *Determinación de la incertidumbre*. Para un $n=2$, es decir, un total de dos réplicas se utiliza un valor $d = 1,128$, por ende de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\sigma_{historica} = \frac{\bar{R}}{d} \quad (48)$$

$$\sigma_{historica} = \frac{0,0166}{1,128} \quad (49)$$

$$\sigma_{historica} = 0,0113adim \quad (50)$$

Finalmente, a partir del dato de desviación histórica y con un $n=2$ ya que el ensayo se realiza por duplicado, se aplicó la siguiente fórmula para obtener el dato final de la incertidumbre asociada a la repetibilidad del ensayo.

$$\mu_{rep} = \frac{\sigma_{historica}}{\sqrt{n}} \quad (51)$$

$$\mu_{rep} = \frac{0,0113}{\sqrt{2}} \quad (52)$$

$$\mu_{rep} = 6,53 \times 10^{-3}adim \quad (53)$$

- Incertidumbre combinada

Para su determinación se utilizó la siguiente fórmula, que se presenta en el Capítulo 4. Adicionalmente, todos los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 4.1 de este mismo capítulo.

$$\mu_C = \sqrt{(1 * 6,53x10^{-3})^2 + (1 * 1,12x10^{-3})^2 + (-0,2127 * 2,89x10^{-2})^2 + (0,61 * 2,25x10^{-3})^2}$$
(54)

$$\mu_C = 1,88x10^{-2}adim$$
(55)

- Incertidumbre expandida

Finalmente, para la obtención de la incertidumbre combinada se utilizó un factor de cobertura de $k=2$ para un 95 %.

$$U = \mu_C * 2$$
(56)

$$U = 1,88x10^{-2}adim * 2$$
(57)

$$U = 3,76x10^{-2}adim.$$
(58)

ANEXOS

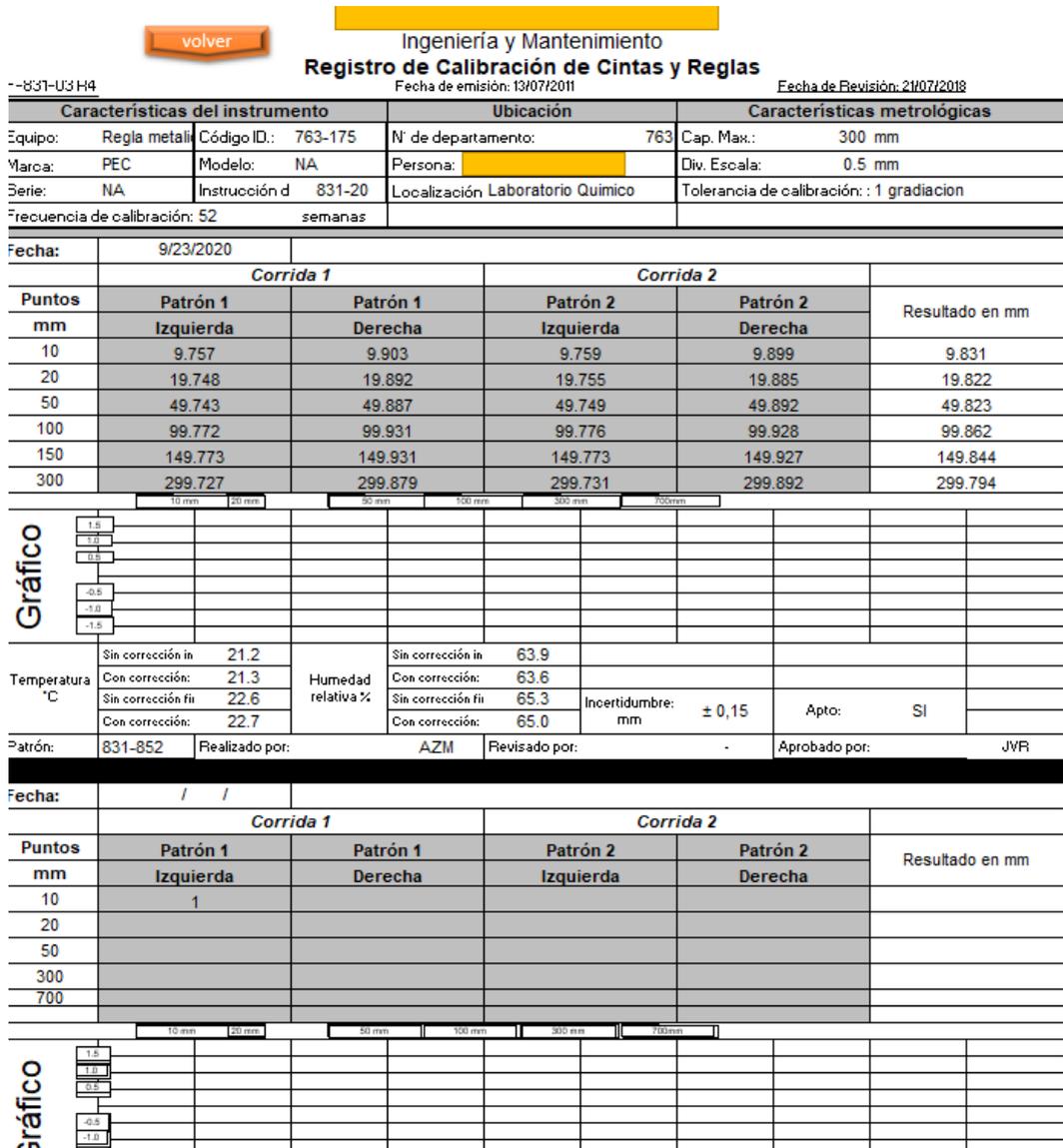


Figura B1. Certificado de Calibración para el la regla metálica 763-175 utilizada como parte del ensayo del Blow Point.