

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales**

“Disminución de variabilidad y control de presión para la mejora de sellos en empaques primarios de productos alimenticios en Pozuelo”

**Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Materiales con el grado académico de Licenciatura**

Realizado por:       Stewart Araya Solís

Profesor Guía:       Ing. Mario Antonio Conejo Solís, Lic.

Profesor Lector:     Ing. José Alberto Ramírez Picado, MBA

Profesor Lector:     Ing. Benito Alberto Stradi Granados, PhD

Asesor Industrial:   Ing. Lenin Hernández Ulate

Compañía de Galletas Pozuelo DCR, S.A.

Julio, 2022

*Carrera acreditada por Agencia  
de Acreditación de programas de  
Ingeniería y de Arquitectura*

## RESUMEN

*Araya Solís, Stewart. Abril, 2022. Disminución de variabilidad y control de presión para la mejora de sellos en empaques primarios de productos alimenticios en Pozuelo, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Profesor Asesor: Mario Antonio Conejo Solís.*

El proyecto consistió en desarrollar e implementar parcialmente una propuesta para la mejora del proceso en una línea de producción, más la mejora en los sellos de empaque para las referencias de Cremas Mixtas Individual (CMI) y Cremas Chocolate Estrella (CCE). El objetivo del estudio fue disminuir la variabilidad del proceso para controlarlo eficientemente al cuantificar el valor de presión, disminuyendo sellos deficientes y a su vez reducir los costos de la línea.

Se debió rediseñar parte del sistema de mordazas que realizan los sellos de los productos. En este rediseño se calculó que la pieza crítica es capaz de soportar estáticamente hasta 295 MPa (con Factor de Seguridad de 4.96) y dinámicamente 155 MPa con vida infinita. Previo a la implementación de las celdas de carga, se realizaron pruebas en laboratorio para comprobar que la fuerza de sello concordara con las fichas técnicas, obteniendo 0,160 N/mm para CMI y 0,200 N/mm para CCE. Se observa una visible oportunidad de mejora respecto a control de la presión, estandarización de la máquina, disminución de tiempo de ajuste y baja de desechos. Se concluye que el proyecto es capaz de mejorar la calidad de los sellos y disminuir los gastos si se continúa utilizando este rediseño.

## ABSTRACT

The project consisted of developing and partially implementing a proposal for the improvement of the process in a production line, plus the improvement of the packaging seals for the references of Cremas Mixtas Individual (CMI) and Cremas Chocolate Estrella (CCE). The objective of the study was to reduce the variability of the process to control it efficiently by quantifying the pressure value, reducing deficient seals, and at the same time reducing the costs of the line.

It was necessary to redesign part of the system of jaws that perform the seals of the products. In this redesign it was calculated that the critical part is capable of withstanding statically up to 295 MPa (with a Safety Factor of 4.96) and dynamically 155 MPa with infinite life. Prior to the implementation of the load cells, laboratory tests were conducted to verify that the seal strength was in accordance with the technical data sheets, obtaining 0.160 N/mm for CMI and 0.200 N/mm for CCE. There is a visible opportunity for improvement with respect to pressure control, machine standardization, reduced set-up time, and reduced scrap. It is concluded that the project can improve the quality of the seals and reducing costs if the redesign is still used in the future.

## CONSTANCIA DE DEFENSA PUBLICA DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

El presente Proyecto Final de Graduación titulado “*Disminución de variabilidad y control de presión para la mejora de sellos en empaques primarios de productos alimenticios en Pozuelo*” y realizado en la empresa “*Pozuelo DCR, S.A.*”, durante el 2do Semestre de 2021 y el 1er Semestre de 2022, ha sido defendido, ante el Tribunal Examinador integrado por los profesores *Mario Antonio Conejo Solís, José Alberto Ramírez Picado, Benito Alberto Stradi Granados*; como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento y su defensa ante el Tribunal Examinador han sido declarados:

Públicos

Confidenciales

---

Ing. Mario Antonio Conejo Solís, Lic.  
Profesor Guía



---

Stewart Alberto Araya Solís  
Estudiante

---

Ing. Jose Alberto Ramírez Picado, MBA  
Profesor Lector

---

Ing. Benito Alberto Stradi Granados, PhD  
Profesor Lector

---

Ing. Ronald Jimenez Salas  
MET Director de Escuela de  
Ciencia e Ingeniería de los  
Materiales

Cartago, 19 de julio del 2022

## CONSTANCIA DE ENTREGA DE DOCUMENTO FINAL AL ASESOR INDUSTRIAL

Señores

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales

Yo, **Lenin Hernández Ulate**, cédula \_\_\_\_\_, hago constar por este medio que he recibido y leído el informe en su versión final del proyecto de graduación titulado *“Disminución de variabilidad y control de presión para la mejora de sellos en empaques primarios de productos alimenticios en Pozuelo”* realizado en la empresa *“Pozuelo DCR, S.A.*

---

Ing. Lenin Hernandez Ulate  
Asesor Industrial

## CARTA DE ENTENDIMIENTO

Señores

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo, **Stuart Alberto Araya Solís**, carné **2016113001**, autorizo (x) no autorizo ( ) a la Biblioteca José Figueres Ferrer del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final de Graduación realizado por mi persona, con el título *Disminución de variabilidad y control de presión para la mejora de sellos en empaques primarios de productos alimenticios en Pozuelo* para ser ubicado en el Repositorio Institucional y Catálogo SIBITEC para ser accedido a través de la red Internet.



---

Stuart Alberto Araya Solís  
Cédula: 207750826

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero otorgar un gran agradecimiento a los profesionales, familia, amigos y cualquier otra persona que me ayudó a llegar hasta este punto de mi vida, carrera profesional y culminación del proyecto de graduación. Especial agradecimiento a Lenin Hernandez Ulate, José Zúñiga Barrantes, Guillermo Rivera Guzmán, Mauricio Bolaños Arias y Andrey Mora por la oportunidad, apoyo y consejos brindados a lo largo de mi estadía en Pozuelo.

Asimismo, agradezco enormemente a todos los profesores que me impartieron clases a lo largo del camino y a la universidad por darme todas las herramientas necesarias para poder alcanzar este punto educativo.

También un ameno agradecimiento al profesor Mario Antonio Conejo Solís, por la ayuda y consejos brindados a lo largo de la confección de este documento.

De nuevo, totalmente agradecido.

## DEDICATORIA

*Dedico este documento a tres personas en particular: mi madre, mi padre y mi pareja. Sin el apoyo, consejos, regaños y risas que me dieron, jamás lo hubiera logrado por mi cuenta.*

# ÍNDICE GENERAL

I.	Introducción .....	12
1.	Descripción del problema.....	12
2.	Justificación del trabajo.....	13
3.	Descripción del proceso productivo.....	13
4.	Objetivo General .....	14
5.	Objetivos específicos.....	14
6.	Alcances y limitaciones.....	15
II.	Marco Teórico.....	16
1.	Mejora continua y <i>Lean Manufacturing</i> .....	16
2.	Máquina empaadora <i>WM18 SynchroFlo</i> .....	17
3.	Fatiga de materiales.....	18
4.	Celdas de carga.....	21
5.	Características de los polímeros .....	21
6.	Empaques de polipropileno biorientado.....	24
7.	Impacto ambiental de los polímeros.....	25
III.	Metodología .....	28
1.	Diagrama de flujo del proceso metodológico.....	28
2.	Determinación de parámetros.....	30
2.1.	Implementación de celdas de carga.....	30
3.	Pruebas en planta y laboratorio .....	31
3.1.	Papel carbón y papel sin carbón .....	32
3.2.	Análisis mecánico de resortes .....	33
4.	Seguimiento de desgaste de componentes.....	34
5.	Impacto ambiental y económico de empaques de BOPP desechados .....	34
IV.	Resultados y su análisis.....	37
1.	Componentes del sistema de sellos de la máquina <i>WM18 SynchroFlo 1</i> .....	37
2.	Prueba de compresión a resortes .....	39
2.1.	Resistencia de las piezas ante la carga transmitida desde el resorte.....	44
2.2.	Análisis dinámico ante la carga transmitida.....	46
2.3.	Factores que afectan la resistencia a la fatiga del sistema.....	49
3.	Control de parámetros en mordazas .....	52
3.1.	Pruebas efectuadas previo a la implementación de las celdas de carga .....	52



4. Procedimiento para el ingreso de parámetros.....	56
5. Ajuste con papel carbón y papel sin carbón .....	57
V. Conclusiones .....	60
VI. Recomendaciones.....	61
VII. Bibliografía .....	62
Actualización al Cronograma de Trabajo.....	65
Anexos.....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No.	Descripción	Página
1	Valores de $a$ y $b$ para calidad superficial ( $k_a$ ) en la fórmula de Marin.	48
2	Efectos de la temperatura de trabajo en la resistencia del acero.	49
3	Análisis estadístico obtenido del ensayo de tensión a las probetas de CCE y CMI.	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.	Descripción	Página
1	Representación del sello de la mordaza en una hoja de papel común.	16
2	Comportamiento de esfuerzo contra deformación de distintos tipos de materiales poliméricos.	18
3	Falla por fatiga de un elemento circular.	19
4	Polimerización del monómero de diacetileno con $n$ repeticiones.	21
5	Representación de configuraciones isotácticas, sindiotácticas y atácticas para una cadena polimérica de alcohol polivinílico (PVA).	21
6	Diagrama de flujo para el proceso metodológico del proyecto.	27
7	Representación de las modificaciones estructurales en el sistema de resortes para implementar de las celdas de carga.	30
8	Ejes, mordazas y tornillos de mordazas (círculo rojo) de la <i>SynchroFlo 1</i> .	36
9	Tornillos y tuercas para el ajuste de la mordaza y sus componentes en la <i>SynchroFlo 1</i> .	37
10	Desgaste superficial en componentes reemplazados de la mordaza en la <i>SynchroFlo</i> .	37
11	Comparación de planitud de superficies entre el resorte antiguo (izquierda) y el resorte nuevo (derecha).	38
12	Gráfica de dispersión de los ensayos de compresión en fuerza contra desplazamiento aplicados al resorte viejo (V, rojo) y al resorte nuevo (N, azul).	40
13	Gráfica de CDF empírica aplicada al desplazamiento obtenido de los seis ensayos de compresión para el resorte nuevo (N, azul) y el resorte viejo (V, rojo).	42
14	Gráfica de CDF empírica aplicada a la fuerza usada en los seis ensayos de compresión para el resorte nuevo (N, azul) y el resorte viejo (V, rojo).	42
15	Vista isométrica y DCL del cilindro guía (4).	44
16	Diagrama $S-N$ graficado a partir de ensayos de fatiga axial para un acero UNS G41300 normalizado	46
17	Fracción de resistencia a la fatiga ( $f$ ) de $S_{ut}$ a los $10^3$ ciclos para $S_e = 0.5 S_{ut}$ a los $10^6$ ciclos.	47
18	Probeta polimérica y equipo empleado para ensayo de tensión según norma <i>ASTM F88</i> .	51
19	Histograma de fuerzas de sello para la referencia de CCE.	52
20	Histograma de fuerzas de sello para la referencia de CMI.	52
21	Sistema de resorte y celdas de carga a colocar en la <i>SynchroFlo 1</i> .	54
22	Sistema de resortes y celdas de carga instalados en la máquina <i>SynchroFlo 1</i> .	54
23	Valores de presión en el sistema de resortes y celdas de carga en tiempo real.	55
24	Sistema de hojas empleadas para el ajuste de mordazas en frío.	56
25	Demostración de las marcas engañosas en la hoja regular (izquierda) y buena interpretación de las marcas (derecha) para el ajuste en frío de las mordazas.	57
26	Sistema de hojas empleadas para el ajuste de mordazas en frío.	58
27	Demostración de las marcas en hojas carbón.	58

## I. Introducción

### 1. Descripción del problema

La compañía de galletas Pozuelo® continuamente busca el progreso de procesos e implementa nuevas tecnologías en diferentes proyectos para aplicar la mejora continua. Si se habla del proceso que involucra el empaque del producto, se puede pensar en cambios de parámetros como: aumento o disminución de temperatura, cantidad de empaques por minuto, velocidad y optimización de sellado. Este sistema se repite en las seis líneas de producción de la empresa, encargadas de crear los distintos tipos de galletas que nacen desde la adquisición de materia prima de distintos proveedores, se procesan y cocinan por diferentes máquinas, se empaquen en empaques plásticos y finalmente son transportados para llegar al mercado y al consumidor. Sin embargo, la variable de presión o esfuerzo de cierre, con la que se forman los sellos de los paquetes de galletas, no se está controlando óptimamente en las secciones finales de las líneas de producción y esto termina produciendo en los sellos eventuales problemas, no constantes, pero tampoco con un periodo determinado.

Algunos de estos problemas son el cierre incompleto o incorrecto que deja una abertura y paso de aire a la galleta, comprometiendo el producto en términos de sensación al ser consumido, una faltante en el paquete o combinación de ambas. Otro problema consiste en una sobrepresión o cierre excesivo, dejando una estética indeseable en el paquete, que adicionalmente termina ejerciendo un desgaste prematuro de las mordazas y cuchillas de corte.

Como referencia, en el mes de junio se recibieron veintiocho quejas que se atribuyen a errores provenientes de la planta, donde tres de las quejas son procedentes de la línea dos, en donde se desarrollaría el proyecto. Las veintiocho quejas totales o las tres de la línea se pueden concebir como pocas, sin embargo, aun así, pueden contribuir en un negativo y gran impacto en contra de la calidad e imagen de la compañía, por lo cual no se debe despreciar la cifra como tal. De igual forma, la cifra puede variar dependiendo de los meses y si llega a aumentar por supuesto la situación será más deficiente.

Asimismo, en media producción también se descartan distintos paquetes. Por ejemplo, los operarios llegan a descartar empaques de galletas individuales debido a que logran observar deficiencias demasiado evidentes, como sellos en mal estado o paquetes que siguen unidos debido a que la cuchilla no logra realizar un corte completo. Otro suceso es el descarte de paquetes debido a sensores y sistemas automatizados que los trabajadores no lograrían detectar. En ambas situaciones, se toma el tiempo para abrir y/o analizar por qué el empaque fue descartado, sin embargo, luego el producto como tal se descarta. El uso de personal para apertura, análisis y el producto desechado contribuyen asimismo en pérdidas en la producción y por ende de dinero, por lo cual el proyecto viene a disminuir esta problemática también.

## 2. Justificación del trabajo

La motivación del proyecto radica en poder aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería en Materiales, para solucionar el problema que radica en la sección de sellos de empaque de producto alimenticio, donde existe una falta de control y cuantificación respecto a la variable de presión o esfuerzo que proporcionan las mordazas hacia los resortes, falta de control de paralelismo entre las superficies de las mordazas, resortes fatigados y un leve desgaste de mordazas. Dichos problemas técnicos producen eventualmente: sellos deficientes, pérdidas de empaques y productos y quejas del cliente o consumidor, lo cual viene a afectar en diversos departamentos de la empresa y a Pozuelo como tal. Al solventar el problema se contribuye al desempeño de los procesos del establecimiento y mantener la imagen de alta calidad que siempre ha mantenido históricamente la compañía.

## 3. Descripción del proceso productivo

La compañía Pozuelo se dedica al negocio de producción de alimentos (galletas) con diferentes sabores. Para conseguir estos productos, es necesario la obtención de materia prima de diferentes proveedores, seguido de mezcla y procesamiento de esta materia para que adquiera su color, sabor y consistencia para ser atractiva hacia el público y cliente, convirtiéndose en el producto final. Por último, el producto es colocado en empaques plásticos sellados que aseguran

que el alimento llegue de manera protegida hasta los puntos de venta y los consumidores. El proyecto llega a impactar positivamente en la parte final del proceso productivo, o sea, en la zona de sellado de plástico y de esta forma aportar tanto a la compañía como en el cliente y consumidor final.

#### 4. Objetivo General

Diseñar una metodología para el ajuste, monitoreo y mejora de los parámetros de sellado en empaque primario BOPP en la máquina *WMI8 SynchroFlo 1* para la mejora en los sellos y la producción.

#### 5. Objetivos específicos

- Determinar la variable de presión entre las mordazas para poder controlarla eficientemente en el proceso.
- Investigar en una base de datos sobre los actuales parámetros utilizados para poder adaptarlos a las pruebas en planta y laboratorio.
- Implementar un procedimiento para el ingreso de los parámetros de la máquina de acuerdo con el plástico empleado.
- Distinguir la deficiencia en los sellos de los empaques plásticos primarios y mejorar el rendimiento del proceso.
- Definir un procedimiento estandarizado para replicarlo en las demás líneas de producción.

## 6. Alcances y limitaciones

### Alcances

- Se involucran dos tipos de envoltorios plásticos de BOPP: Cremas mixtas individual (CMI) y Cremas chocolate estrella (CCE).
- El proyecto abarca el involucramiento de los departamentos de proyectos, mantenimiento, operación, calidad, producción y productividad.
- El proyecto será apoyado por proveedores, para la compra e instalación del sistema de medición de parámetros.

### Limitaciones

- El proyecto solamente estará desarrollándose en la línea dos de la planta, ya que históricamente ha presentado problemas por deficiencia en los sellos, convirtiéndola en una línea de producción crítica según este aspecto.
- El proyecto abarcará hasta la instalación de las celdas de carga. Las pruebas posteriores se dejan planteadas y estarán a cargo del personal de la compañía.

## II. Marco Teórico

### 1. Mejora continua y *Lean Manufacturing*

En esta época contemporánea, el concepto y aplicación de la mejora continua es un objetivo que se ha estado aplicando en prácticamente todas las empresas a nivel global, para lograr mantenerse competitiva ante sus rivales. De la mano con esto, *lean manufacturing* busca reducir todos los tipos de desperdicios y aprovechar todos los recursos que se producen en una empresa, para promover la mejora continua de los procesos (Rajadell Carreras & Sánchez García, 2010).

En este proyecto, se pretende aplicar los dos conceptos anteriores al estandarizar un procedimiento para el mantenimiento y colocación de parámetros en una máquina, que son necesarios para la confección de los sellos en los empaques primarios de galletas (EPG). Actualmente se cuenta con el control de temperatura y paquetes por minuto (velocidad y tiempo) para elaborar los sellos por medio de un par de mordazas, pero en el proceso también existe una variable de presión que no se tiene cuantificada.

Por lo tanto, el control parcial del sistema produce ocasionalmente que se originen sellos defectuosos, donde los más evidentes son descartados inmediatamente por medio de los operarios, pero algunos que parecen bien a simple vista, llegan a manos de consumidores con productos deficientes o faltantes. La falta de control también repercute al momento de tomar decisiones administrativas para contrarrestar el problema como tal, puesto que no se sabe que falla o falta (Ramos, 2015). Al lograr controlar el parámetro de presión entre las mordazas, se buscará la combinación más eficiente para producir sellos de buena calidad, minimizar las pérdidas en producción de la línea (aplicando *lean manufacturing*) y contribuir a la mejora continua de la empresa.

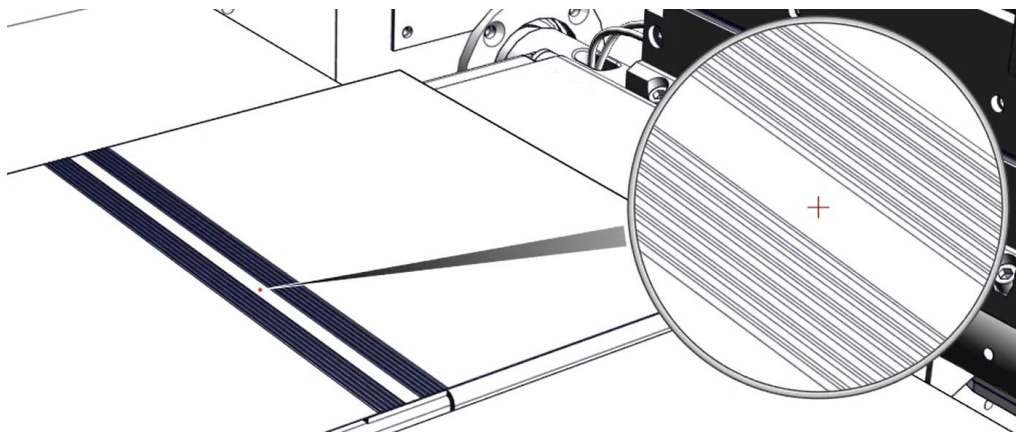


## 2. Máquina empacadora *WM18 SynchroFlo*

La máquina *WM18 SynchroFlo* es la encargada de empaquetar las galletas individuales en un conjunto de cuatro unidades para conformar los EPG. Consta de un motor que gira dos ejes con mordazas acopladas por medio de un sistema de transmisión de piñones, las cuales crean el sello por medio de temperatura y presión.

En el caso de la temperatura, esta se suministra hacia las mordazas por medio de resistencias y la lectura la realiza una termocupla. Para la nivelación y paralelismo de los ejes, colocación y ajuste de los componentes de las mordazas y presión de estas, se usan pequeños tornillos para el caso de los componentes de las mordazas y diferentes tuercas y tornillos para el resto de los requerimientos.

Como se mencionó anteriormente, no hay una lectura de presión como tal. Para asegurarse de que la mordaza creará un sello correcto cuando el plástico pase a través de este y ejercer alguna verificación del paralelismo, se conduce a través del par de mordazas una hoja de papel común como se observa en la figura 1. Si el sello es homogéneo y el corte es completo en toda la sección, entonces la mordaza y sus componentes están correctamente ajustada en términos de alineación, paralelismo y presión. Si no es así, se ajustan los tornillos y tuercas del lado que le hizo falta presión o que tiene demasiada presión, se vuelve a pasar el papel y se comprueba hasta que la configuración sea la correcta.



**Figura 1.** Representación del sello de la mordaza en una hoja de papel común.

Sin embargo, registros históricos indican que el uso de papel regular puede generar impresiones engañosas. Esto se puede comprobar al emplear unos tipos de papel especial para la prueba del sello llamados *carbon paper* y *carbonless paper* provenientes de la compañía *Greener*. Ambos papeles muestran una tonalidad oscura al ser sometidos a presión, temperatura y al contrastarlos en una prueba de sello contra el papel convencional, donde este mostraba una “buena” calidad de sellado, el *carbon paper* mostró la falta de homogeneidad en el sello. Por lo cual, se pretende emplear este tipo de papeles para las pruebas de mejoras de sellos.

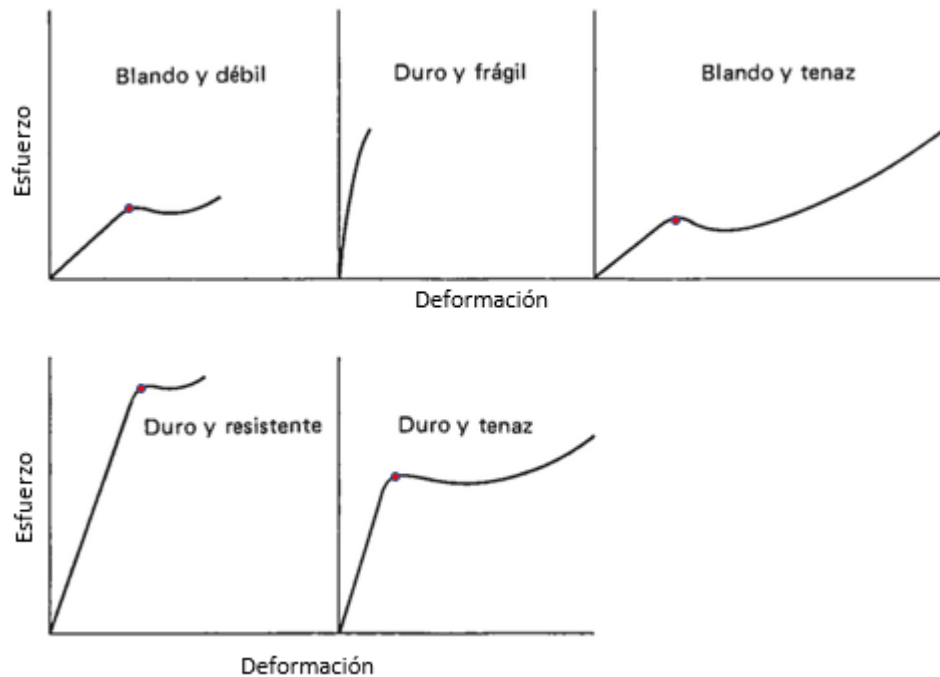
### 3. Fatiga de materiales

En partes mecánicas o cualquier elemento que esté ante un tipo de fuerza, esta pieza debe estar diseñada para soportar estos sucesos físicos y así ejercer correctamente su función y que no falle o fracture. Para ello, el elemento mecánico debe ser lo suficientemente resistente para soportar la fuerza, donde la pieza será más o menos resistente de acuerdo con su geometría, tipo de material, tratamiento térmico, proceso de manufactura y mantenimiento. Dependiendo de la condición en que se encuentre, esta carga puede ser estática o dinámica.

Las cargas estáticas son fuerzas o pares de torsión que están ubicadas en una sección de una pieza en forma puntual o distribuida. Para considerarse estática, la fuerza o par de torsión no puede cambiar su ubicación, dirección, ni magnitud. Este tipo de condiciones estáticas se dan regularmente en objetos sin movimiento como por ejemplo vigas y secciones estructurales de los diversos edificios. Por otro lado, las cargas dinámicas son el opuesto de las estáticas, ya que pueden cambiar de magnitud, dirección y ubicación de la carga en el componente, por lo cual se les puede llamar como esfuerzos fluctuantes (Shigley *et al.*, 2019).

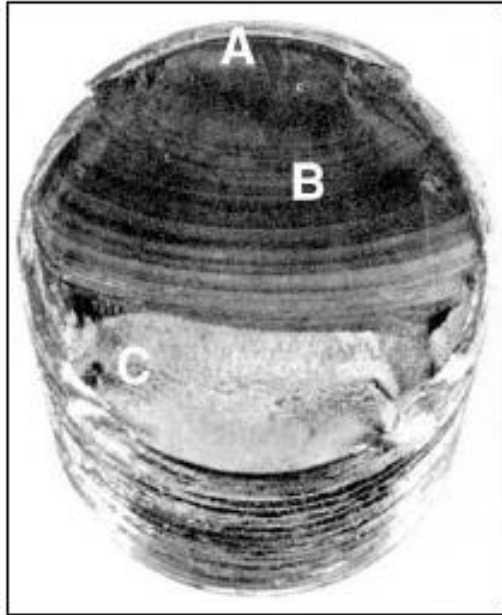
Las fallas por cargas estáticas llegan a presentar un tipo de deflexión puesto que el esfuerzo que se llega a aplicar al elemento supera la resistencia a la fluencia o el límite elástico del material. El límite elástico es el punto, cuando el material está sometido a un esfuerzo, donde termina la deformación elástica y comienza la deformación plástica o permanente. Este punto se muestra de mejor forma en la figura 2 de un color rojo. Como se puede observar, dependiendo del material se necesitará más o menos esfuerzo para alcanzarlo, donde inclusive algunos no llegan a enseñar una deformación plástica y fallan prácticamente en el límite elástico. Sin embargo,

en el caso de las cargas dinámicas, estas por lo general se mantienen en el rango de deformación elástica, pero debido a su comportamiento y al gran número de ocasiones que se dan a cabo, terminan haciendo que el material falle por fatiga.



**Figura 2.** Comportamiento de esfuerzo contra deformación de distintos tipos de materiales poliméricos (Billmeyer, 1975).

El gran problema de las fallas por fatiga es que no muestran un tipo de advertencia, son abruptas, repentinas y esto las hace peligrosas. Una vez roto el elemento, la falla por fatiga se observa muy definidamente por las “marcas de playa” presentes en la zona de ruptura, como se muestra en la figura 3.



**Figura 3.** Falla por fatiga de un elemento circular. La falla comienza en A, se distribuye a través del elemento hacia B (donde se ven claramente las marcas de playa) y la falla abrupta ocurre en C, donde el área transversal ya no es capaz de soportar la carga que una vez resistía (Shigley *et al.*, 2019).

El sistema de mordazas de la *SynchroFlo* 1 está trabajando con numerosas cargas dinámicas, por lo cual es importante tener en cuenta la posibilidad de este tipo de comportamiento. Los elementos de mayor interés serían en este caso los resortes, puesto que son el elemento amortiguador de la fuerza proveniente de las mordazas. Aunque el elemento no llegue a fallar o a presentar marcas de falla que indiquen el avance de la fatiga, por el continuo uso estos pueden perder poco a poco su capacidad de amortiguamiento al disminuir su constante de resorte, la cual depende de la fuerza aplicada y la distancia desplazada del mismo. Una disminución en la constante del resorte producto de la fatiga de este, induce un desequilibrio en la homogeneidad del sistema de resortes y puede provocar una sobrepresión a la hora de ajustar los tornillos que posteriormente afecte los valores de fuerza mostrados en pantalla y por ende la estandarización del proceso.

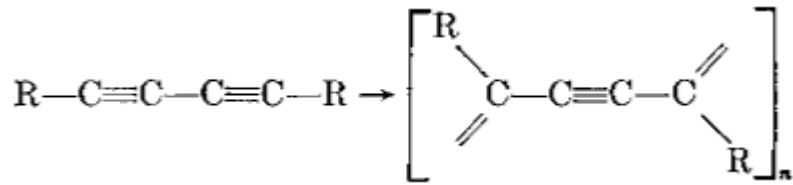
#### 4. Celdas de carga

Para entender que son las celdas de carga que estarán integrándose al proyecto, se debe entender lo que es un transductor. El transductor es un dispositivo que realiza la conversión de una magnitud física a una magnitud eléctrica, como intensidad o voltaje (Granda & Mediavilla, 2015).

Las celdas de carga son transductores diseñados específicamente para la medición de fuerza (Newtons, MPa, psi...). Están confeccionados generalmente por un soporte elástico con galgas extensiométricas que, al recibir el impacto, lo transforman en una señal eléctrica que muestra un valor que la persona pueda interpretar. En este caso, las celdas se implementarán en el sistema de la *WMI8 SynchroFlo* para poder cuantificar la fuerza que la mordaza le introduce al plástico cuando está funcionando con normalidad. Dicha fuerza es transmitida hacia los resortes que se encargan de amortiguarla.

#### 5. Características de los polímeros

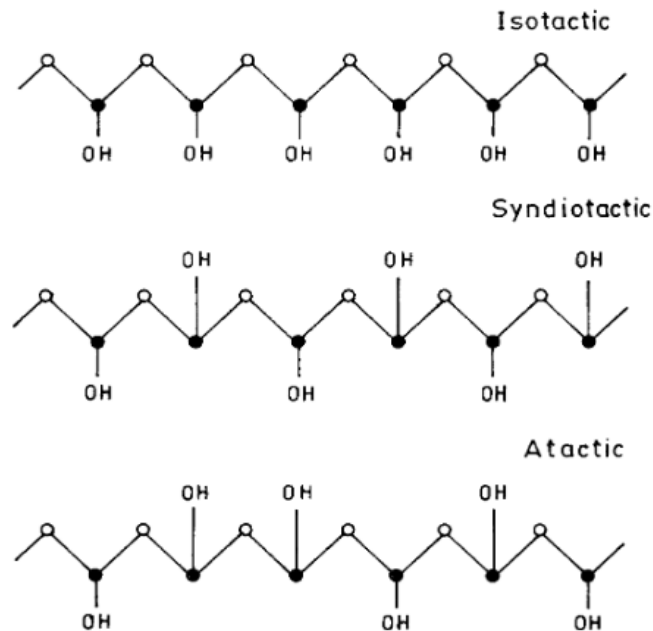
Puesto que el proyecto involucra sellos de un empaque plástico, es importante entender el comportamiento y las propiedades de los polímeros y como estos pueden ser afectados o cambiados. Los polímeros son un material que está conformado en forma de cadenas creadas por enlaces atómicos entre el elemento de Carbono y su capacidad de generar hasta cuatro enlaces con otros elementos, incluido sí mismo. En este sistema entran principalmente átomos de Hidrógeno, Oxígeno, Cloro y Nitrógeno, los cuales añaden diferentes propiedades al momento de conseguir el producto final. Esencialmente, el término polímero viene del conjunto de monómeros, que a su vez se refiere a la unidad repetitiva a lo largo de la cadena que conforma el polímero, como se muestra en la figura 4. De acuerdo con la composición y forma del monómero, el polímero puede incrementar su longitud, tener ángulos entre los enlaces covalentes y ramificaciones.



**Figura 4.** Polimerización del monómero de diacetileno con  $n$  repeticiones (Baughman, 1974).

Asimismo, el tamaño de la cadena polimérica puede llegar a influir más en las propiedades del material plástico que su propia composición química, como lo es en el caso de polietileno (PE), poliestireno (PS) y polimetilmetacrilato (PMMA) (Rodríguez *et al.*, 2014).

Otro factor que llega a modificar las características del polímero es su configuración en la cadena principal. Con configuración se refiere a la ubicación de unos determinados átomos en la cadena, generando así un orden específico o desorden atómico. Esto se observa de mejor forma en la figura 5 con el alcohol polivinílico (PVA).



**Figura 5.** Representación de configuraciones isotácticas, sindiotácticas y atácticas para una cadena polimérica de alcohol polivinílico (PVA) (Ram & Mandal, 2004).

Como se mencionó anteriormente, una configuración atribuye diferentes propiedades al polímero. Por ejemplo, si se habla del PS a temperatura ambiente, su orden atáctica es un

polímero amorfo a temperatura ambiente, el isotáctico llega a presentar un grado de cristalización y el sindiotáctico es capaz de cristalizar, pero también posee un mayor punto de fusión y menores propiedades dieléctricas lo cual lo beneficia para determinadas funciones que sus contrapartes no logran realizar. Sin embargo, así como posee mejores propiedades, la fabricación y desarrollo del PS sindiotáctico es más complicada puesto que es un orden específico (Wang *et al.*, 2006).

Además, los polímeros poseen ciertas características en cuanto a su comportamiento térmico. Estas características influyen en el estado físico en el que un polímero puede existir. Inicialmente se tiene los polímeros amorfos, los cuales a nivel molecular se pueden imaginar como muchas cadenas con pocas o nulas ramificaciones en constante movimiento, el cual aumenta conforme se eleva la temperatura (Rodríguez *et al.*, 2014). La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) es una temperatura específica para cada tipo de polímero, la cual indica un cambio en la libertad de movimiento de los átomos. Si el polímero está por debajo de esta temperatura los segmentos del polímero no tienen la energía suficiente para moverse entre ellos y el polímero toma el comportamiento de un vidrio (frágil). Y, al contrario, si la temperatura del polímero está por encima de la  $T_g$ , este retorna a su condición viscosa/hulosa.

Otra propiedad de los polímeros es la cristalinidad que se obtiene al disminuir la temperatura por debajo de la temperatura de cristalización ( $T_c$ ), donde los átomos y cadenas de los polímeros obtienen un grado de ordenamiento. Para abarcar de mejor forma el concepto, los polímeros amorfos se interpretan sin un grado de orden establecido y por lo tanto, se toman como que no poseen cristalinidad; luego siguen los polímeros semicristalinos, que llegan a tener un ordenamiento parcial (amorfo y cristalino); y por último los polímeros totalmente cristalinos con un gran ordenamiento molecular (Rodríguez *et al.*, 2014). Los polímeros cristalinos poseen a temperatura ambiente una  $T_c$  superior a su temperatura actual, los semicristalinos poseen una  $T_c$  cercana a su temperatura de trabajo y los amorfos pasaron por un proceso de subenfriamiento, donde las cadenas no poseen el tiempo suficiente de ordenarse y por lo tanto no poseen la energía suficiente para cristalizar, a pesar de estar por debajo de su  $T_c$ .

También es posible clasificar los polímeros en: termoplásticos, termoestables y elastómeros. Los polímeros termoplásticos están formados por cadenas largas y poseen generalmente un comportamiento maleable y dúctil, pueden o no tener ramificaciones, las cadenas principales pueden estar entrecruzadas entre sí y entre átomos de cadenas diferentes se conectan por medio

de enlaces de Van der Waals. Además, pueden llegar a ser cristalinos o amorfos. Los polímeros termoestables también están constituidos por cadenas largas de polímeros, pero poseen un nivel mucho mayor de entrecruzamiento, lo cual crea una red tridimensional. Son más fuertes que los termoplásticos, pero más frágiles y al contrario de los termoplásticos estos no se funden, sino que se descomponen al elevar su temperatura. Por último, se tienen los elastómeros que comúnmente se les conoce como caucho o hule. Pueden llegar a tener una deformación de hasta un 200% su valor nominal y pueden ser termoplásticos o termoestables (Askeland *et al.*, 2012).

Los empaques de BOPP son termoplásticos, por lo cual son dúctiles, amorfos en este caso y pueden refundirse y volver a reciclarse hasta cierto nivel en nuevos envoltorios (Rohit & Dixit, 2017). Sin embargo, el problema radica en que la película de poliuretano que se coloca en la lámina de BOPP es termoestable, por lo cual reciclar el empaque con un diseño de poliuretano se vuelve complicado.

## 6. Empaques de polipropileno biorientado

Ambos plásticos empleados para la obtención de los sellos en EPG son de polipropileno biorientado (BOPP por sus siglas en inglés). El BOPP es un tipo de plástico aplicado ampliamente en la industria de empaque debido a sus excelentes propiedades a la hora de transportar y resguardar alimento. Su resistencia tensil permite que el empaque soporte los impactos o esfuerzos durante todo el transporte sin sufrir alguna ruptura y hasta que llegue al consumidor o cliente. Asimismo, su comportamiento al ser empleado contra alta temperatura le permite crear sellos en empaques de buena calidad, protegiendo la inocuidad del alimento mientras llega al consumidor; mientras que a temperatura ambiente y en humedad relativa consigue mantener intacta la calidad del producto. El proyecto pretende optimizar estas propiedades para conseguir un sello de alta calidad (Mo *et al.*, 2014).

Otro aspecto importante son sus propiedades visuales/superficiales, ya que inicialmente es una lámina transparente que por ende permitirá ver el interior del empaque, el producto que contiene y también funciona como sustrato al permitir colocarle una película superior parcial o total de poliuretano con colores determinados, opacos y que son el diseño del empaque y la estética del objeto (Aiyengar & Divecha, 2012). Esta película de poliuretano actúa como aglutinante entre



sí misma con el BOPP y es la sustancia más ampliamente utilizada para este tipo de aplicaciones debido a su excelente resistencia a la corrosión, desgaste y flexibilidad; sin embargo, para llegar a cumplir estos estándares normalmente se le introducen otros componentes químicos (resinas) (Zhang *et al.*, 2021).

Sin embargo, las propiedades del BOPP pueden llegar a ser afectadas justo a la salida del proceso de manufactura, con pequeños defectos puntuales que cristalizan el polímero, haciéndolo opaco en ese sitio específico (CHEN *et al.*, 2020). Dependiendo de las propiedades de dicho defecto, puede impactar en mayor o menor medida en las características ópticas y mecánicas del empaque, aunque por lo general son fácilmente visibles ante el ojo humano (CHEN *et al.*, 2020).

Los plásticos BOPP con los que se harán pruebas serán los de Cremas Chocolate Estrella (CCE) y Cremas Mixtas Individual (CMI), las cuales poseen un espesor de 20  $\mu\text{m}$  y 27,5  $\mu\text{m}$  respectivamente. Es natural pensar que al poseer más espesor el empaque de CMI presentará en general más resistencia ante las pruebas, aunque esto se debe comprobar.

Sin embargo, parte de la estética del EPG también involucra como se observa el sello y una mala confección de este afecta negativamente esta característica, por lo cual el proyecto también ayudará a mantener una buena imagen visual en esta área.

## 7. Impacto ambiental de los polímeros

Se sabe actualmente que el impacto ambiental causado por los polímeros pone en grave peligro todo el ecosistema del planeta. El cambio drástico del calentamiento global inició en el siglo XIX con la segunda revolución industrial debido a la acumulación de gases de efecto invernadero, empezando a afectar las temperaturas del ártico y posteriormente en Europa, Asia, Norteamérica y consecutivamente, empezó a cambiar la temperatura en el hemisferio sur del planeta en 1880 (Abram *et al.*, 2016).

A partir de 1891, la temperatura a nivel mundial ha seguido en aumento, a tal punto que el 2020 se consolidó como el año más cálido de la historia humana desde donde se tienen registros y

obteniendo un aumento de 1.13 °C con respecto a la época preindustrial (HuffPost, 2020; Japan Meteorological Agency, 2021).

Al continuar por el mismo camino, se estima que para el 2030 se llegue a 2 °C con respecto al periodo preindustrial, en el 2050 se alcance 3 °C, 2070 los 4 °C y 2090 se consiga 5 °C (Li *et al.*, 2021). En la actualidad, la temperatura del planeta se está acercando lentamente a 1.5 °C sobre el nivel preindustrial y según el *Acuerdo de París* del 2015, se pactó que se desea mantener el nivel de la temperatura a nivel global muy por debajo de los 2 °C y mantener un máximo de 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales (Naciones Unidas, 2015).

Para entender la magnitud del problema en caso de ocurrir este aumento de temperatura, si el mundo llegase a tan solo 2 °C, en días de calor extremo en las latitudes medias se llegaría hasta un crecimiento de 4 °C y los niveles sobre el nivel del mar para el 2100 se elevarían de 0.36 m hasta 0.87 m, junto con diversos desbordes en los ríos que consecuentemente causan inundaciones y obligan al ser humano a desplazarse lejos de la zona (Kam *et al.*, 2021; Lieberman, 2021). Además, las personas no son las únicas afectadas con este problema. Los animales y las plantas, incluyendo los marinos, terrestres y aves; y desde zacate hasta árboles, serían severamente afectados por un aumento del 2 °C y serán obligados a desplazarse de su hábitat y evolucionar prematuramente ante la situación.

Esto solo genera un tipo de estrés en las especies y la situación como tal culmina en destrucción de los hábitat, ruptura de relación entre las comunidades de la naturaleza y finalmente en posibles múltiples extinciones (Root *et al.*, 2003). Consecuentemente, pérdida de vida marina (arrecifes y peces) induciría un decrecimiento en la industria del pescado, del cual depende un enorme sector de la población mundial y produciría una ola de desempleo y pobreza. Asimismo, el aumento de temperatura llega a afectar los cultivos de maíz, arroz y trigo; recurriendo en los mismos problemas anteriormente mencionados (Lieberman, 2021).

Ahora, tomando en cuenta puntualmente los plásticos, estos son un material que se fabrican y se usan a gran escala mundialmente debido a sus distintivas características que otros materiales como metales, cerámicos o compuestos no logran conseguir del todo o de manera eficiente. Es tanto la producción y su uso, que en el 2019 se produjeron a nivel global trescientos sesenta y ocho millones de toneladas de plásticos que llegan a relacionarse en productores de materia

prima polimérica, compañías que manufacturan con polímeros e inclusive empresas que reciclan los plásticos (Plastics Europe, 2020).

Sin embargo, se sabe muy bien que esta producción a gran escala produce problemas ambientales. Estas dificultades involucran toxicidad, comportamiento ante el ambiente, degradación y emisiones de gases a la hora de su fabricación, dejando una huella de carbono (Shen *et al.*, 2020). Asimismo, se ha evidenciado que las emisiones de gases ocurren en cada fase del ciclo de vida del polímero, o sea, extracción del polímero desde el petróleo, transporte, manufactura, tratamiento como desecho e ingreso al ambiente (Shen *et al.*, 2020).

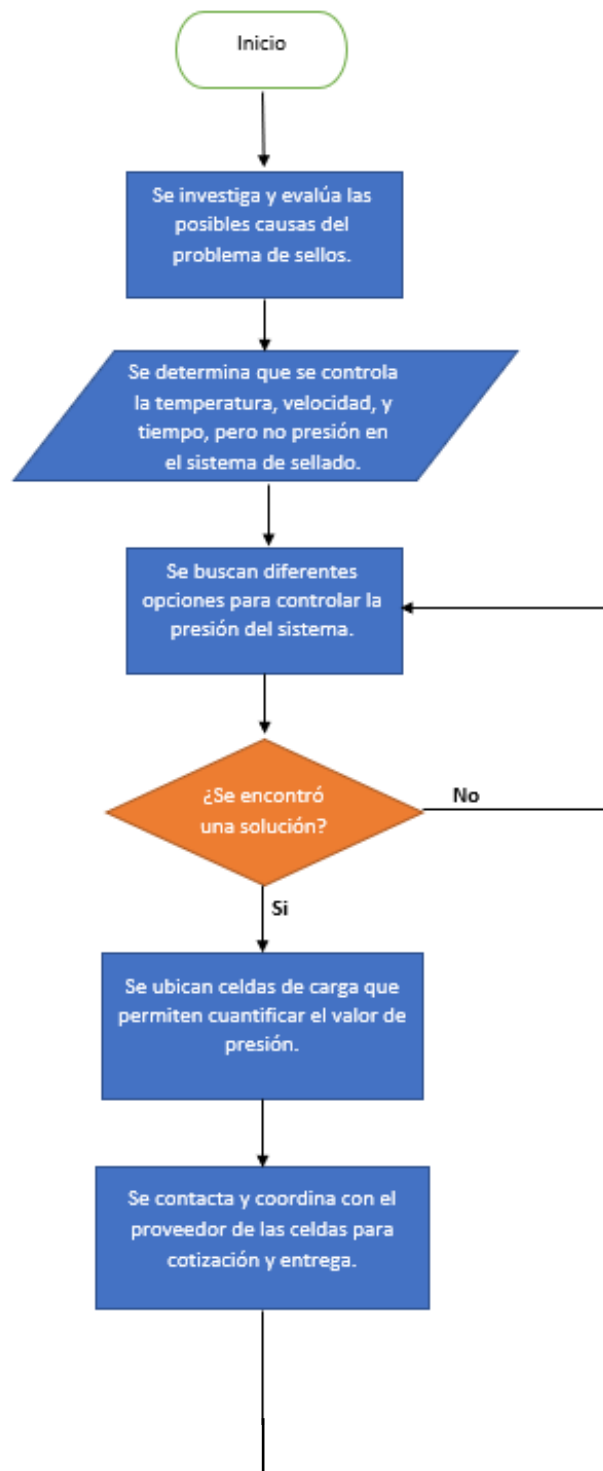
Debido a las emisiones de gases y a la contaminación producida, por lo general se pretende usar el reciclaje como una herramienta para la disminución del impacto de la situación. Sin embargo, existen otros métodos de disposición de polímeros como los vertederos de basura o la incineración (Björklund & Finnveden, 2005). El mayor problema de estas últimas dos opciones es que la descomposición del polímero en el vertedero puede tomar varios años en llevarse a cabo y por otro lado la incineración produce nuevamente manifestaciones de gases a la atmósfera.

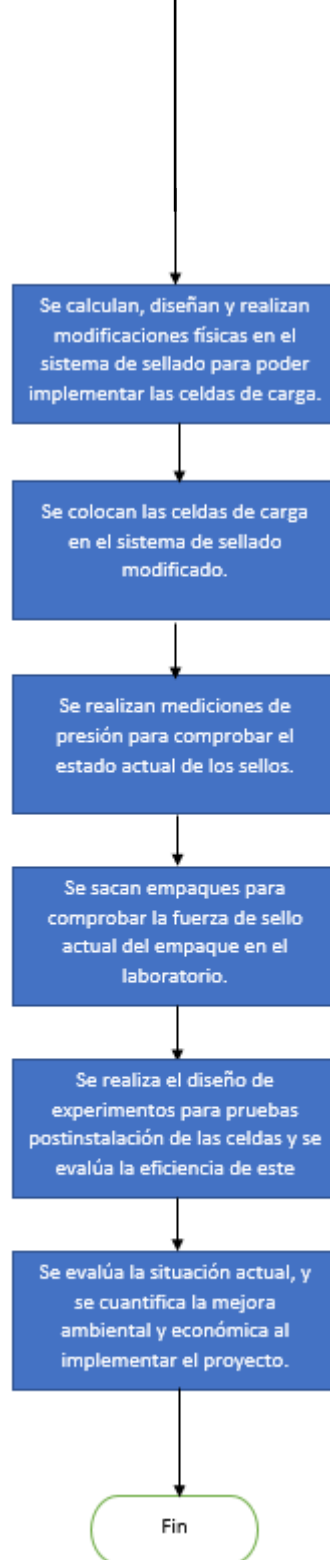
Puesto que el proyecto vendrá a disminuir los empaques plásticos que se botan por traer un defecto en el sello, este a su vez reducirá la huella de carbono y las emisiones de gases de la empresa, lo cual contribuye a la disminución del calentamiento global y se asocia a las metas y principios de la compañía.

### III. Metodología

#### 1. Diagrama de flujo del proceso metodológico

Para poder interpretar de mejor forma como se realizará la metodología. En la figura 6 se muestra un diagrama de flujo que contempla todos los pasos a seguir para el correcto desarrollo del proyecto.





**Figura 6.** Diagrama de flujo para el proceso metodológico del proyecto.

## 2. Determinación de parámetros

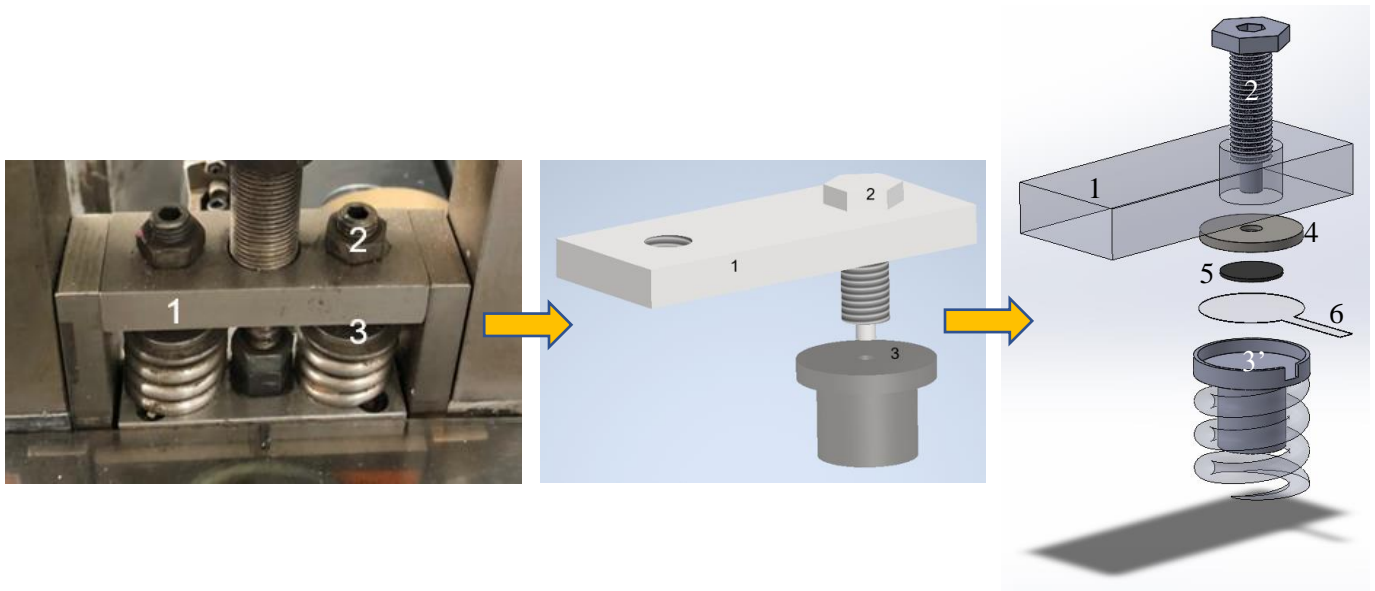
Inicialmente, se controló los cuatro parámetros del sistema que dieron origen a los sellos de alta calidad, siendo estos: temperatura, tiempo, velocidad y presión. La temperatura se inspeccionó por medio de termocuplas integradas en la máquina que envían la magnitud de la temperatura a una pantalla; la velocidad y tiempo se obtuvieron por medio del valor de paquetes por minuto mostrado en pantalla y ajustado por medio de una perilla que aumenta la velocidad de la banda que transporta las galletas e incrementa las revoluciones por minuto del motor. Por último, para controlar la presión se instaló las celdas de carga.

### 2.1. Implementación de celdas de carga

Se ubicó cuatro celdas de carga de tal forma que el eje central de las cuatro sea colineal con el eje central de todo el sistema de amortiguamiento, como se muestra simbólicamente en la figura 9, con el fin de medir la presión en ambos lados de la mordaza. Las celdas que se integran al proceso son las *FlexiForce™ Standard Model A401* (Tekscan, 2021). Su ficha técnica respectiva se muestra en la sección de Anexos. Para implementarlas se modificó un componente del sistema mecánico de la máquina y se implementaron tres elementos más, respectivamente: la pieza cilíndrica (3) que es parcialmente introducida en el resorte, la pieza cilíndrica (4) que posee un agujero compatible con el pin del tornillo (2), la pieza (5) o *puck*, que se emplea para concentrar la fuerza recibida y finalmente la celda de carga (6). La placa (1) se mantienen exactamente igual, así como la (1') que es similar a la (1), con la excepción de que posee un par de protuberancias cilíndricas que sirven para posicionar correctamente el cilindro durante el proceso. Los cambios se observan de manera gráfica en el diagrama de la figura 7.

En el diagrama solamente se muestra la modificación en una sección del sistema, pero la idea se implementó en los cuatro sistemas de resorte. El pin de (2) se introdujo en el agujero de (4) para presionar a (5) contra (6). (5) se empleó puesto que (6) posee una zona de sensibilidad o detección menor a su área máxima y (5) abarca correctamente esa superficie. La pieza (3) pasó a ser (3') puesto que su modificación elimina el pequeño agujero que poseía en la superficie

superior, además de tener una ranura donde se colocó la celda de carga y la contuvo para que no pueda salirse del sistema.



**Figura 7.** Representación de las modificaciones estructurales en el sistema de resortes para implementar de las celdas de carga.

Los dibujos en 3D y los planos de las piezas fueron realizados con los software *SolidWorks* e *Inventor Software* (Autodesk, 2021; Dassault Systemes, 2021).

### 3. Pruebas en planta y laboratorio

Fue necesario efectuar pruebas en laboratorio para determinar qué tan eficiente estaban los sellos de los productos antes de instalar las celdas de carga. Para ello, se obtuvieron productos tanto de CMI como CCE, donde se tuvo una velocidad fija en la línea de 300 productos/min para CMI y 340 productos/min para CCE. En este momento se utilizaba solamente un valor de temperatura para CMI y CCE de 160 °C y 130 °C respectivamente. Es importante poner en mesa que el rango de temperatura de CMI es de (115 – 140) °C y de (105 – 125) °C para CCE según la ficha técnica del proveedor, por lo cual los empaques se estaban trabajando por encima de lo recomendado.

Y posteriormente, se cuestionó que valor de fuerza se deberá colocar una vez instaladas las celdas. La ficha técnica de ambas referencias indica un valor de 80 psi de sellado, de acuerdo con la temperatura. Sin embargo, este valor es meramente teórico puesto que se determinó en un laboratorio en condiciones ideales con pruebas pausadas, minuciosas y por lo tanto se estimó que el valor de fuerza que se manifiesta en el sistema de resortes fue diferente. Por dicha razón, inicialmente se pidió a un técnico que ajuste todos los componentes como se realiza con regularidad, y se obtuvo un valor de fuerza con ese ajuste y se escogió de acuerdo con este número el valor de fuerza a ubicar en las celdas de carga.

Para determinar el tamaño de la muestra para las pruebas, en un inicio se tomó en cuenta una hipótesis nula junto con una hipótesis alternativa del experimento, además de margen de error, porcentaje de confiabilidad y tamaño de la población (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2008). Sin embargo, el valor obtenido para la muestra era muy extenso, lo cual afectaba con el tiempo disponible para realizar el experimento y producto eliminado de la producción.

Por esta razón, se escogió un número de 100 EPG para las pruebas realizadas previo a la instalación de las celdas de carga para ambas referencias, dando un total de doscientos empaques en esta prueba, puesto que es un valor que abarca una buena cantidad de producto sin afectar en gran medida la producción. Este valor de 100 EPG se justifica por las pruebas que ya la compañía ha realizado en otras ocasiones a sellos de empaque, donde dichas pruebas han sido satisfactorias y donde el número de EPG era menor a cien.

Luego de definir la cantidad de empaques a analizar, se ejecutó una serie de pruebas en el texturómetro *TA.XT plus Texture Analyser*, el cual es capaz de realizar un ensayo de tensión en el sello de los EPG basado en la norma *ASTM F88 Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Materials*, mostrada en la sección de Anexos, para determinar cuánto esfuerzo soporta y delimitar un valor mínimo que se necesite para considerar al sello como alta calidad de acuerdo a su conjunto de parámetros (ASTM, 2021).

### 3.1. Papel carbón y papel sin carbón



Como se mencionó anteriormente, el papel carbón y papel sin carbón se emplearían al momento de ajustar la mordazas como tal de la figura 8 con los tornillos señalados con el círculo rojo. De nada sirve controlar y ajustar correctamente el sistema de resortes de la máquina si las mordazas, que son las que tocan los empaques plásticos, no están correctamente acopladas.

Inicialmente, se ajusta la altura del eje donde están ubicadas las mordazas para que quede una holgura entre mordaza y mordaza al momento de pasar el empaque plástico. Esta holgura se determinaría cuando se realicen las pruebas. Una vez terminado este ajuste, se emplea el papel carbón o *carbon paper*, para ajustar los tornillos antes mencionados y analizar la marca impresa en el papel mientras al sistema no se introduzca temperatura (ajuste en frío). Si es homogénea, el ajuste de los tornillos fue el correcto y en caso contrario se deberá ajustar o desajustar los tornillos pertinentes para conseguir la marca estampada correcta.

Posteriormente, se utiliza el papel sin carbón o *carbonless paper* para el ajuste en caliente de las mordazas. Se usa este tipo de papel puesto que en altas temperaturas el papel carbón llega a fundirse mientras que el papel sin carbón no. Y se realiza este segundo ajuste debido a que con la introducción de temperatura al sistema ocurre la dilatación de los componentes metálicos de las mordazas y como el material se expande, el ajuste de los tornillos y la holgura entre mordazas para el paso del envoltorio se pueden ver afectados negativamente.

### 3.2. Análisis mecánico de resortes

Como se mencionó en la sección del marco teórico, los resortes empleados para el amortiguamiento de la fuerza en las mordazas pueden verse afectado por la fatiga y dependiendo de su condición, un resorte viejo se contraerá en mayor grado que uno nuevo.

Para comprobar el impacto de este comportamiento, se colocó un resorte viejo, seguido de uno totalmente nuevo en la máquina *MTS Bionix Axial/Torsional Tabletop Test Systems* modelo 370.02 (MTS, 2017) ubicada en la escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica y se analizó para una misma fuerza, el desplazamiento que reciben los resortes.

Previo a lo anteriormente mencionado, se obtuvo de una manera empírica la constante del resorte antiguo, empleando un bloque de carga calibrado de 40 kg y midiendo la longitud del resorte antes y después de aplicar la carga. Seguido a esto se midió la longitud del resorte mientras este estaba en estado de compresión y en funcionamiento en la SynchronFlo para determinar con que carga trabaja el resorte normalmente y de acuerdo con esta, realizar el ensayo de compresión en el laboratorio.

Como referencia, se averiguó que los resortes fueron cambiados el 8 de noviembre del 2020 y anterior a eso nunca se habían sustituido. No se pudo obtener una fecha exacta de la instalación de las máquinas SynchronFlo, pero se asegura que fue entre los años 1990 y 1995, indicando que los resortes llevaban un mínimo de veinticinco años sin sustituirse, lo cual llegó a influir en el análisis de resultados.

#### 4. Seguimiento de desgaste de componentes

Antes de iniciar las pruebas en planta, se revisó el estado superficial de los componentes de la mordaza. Como se mencionó en la sección de alcances y limitaciones, el proyecto se dio solamente en la línea dos, la cual se bifurca en tres máquinas de empaque y donde este estudio se desarrolló exclusivamente en una de las bifurcaciones. Específicamente, se empleará en la *WM18 SynchronFlo 1* debido a que los componentes de las mordazas de esta máquina son los que se cambiaron más recientemente (11 de Julio, 2021) y esto permitió estudiar la unidad lo más nueva posible.

Asimismo, se efectuó una revisión periódica cada dos semanas para darle seguimiento al desgaste superficial de los componentes y dependiendo de la situación, se realizó cambios en los parámetros de la máquina. También se buscó realizar un análisis metalográfico de los componentes para observar las características microestructurales de la zona afectada y sin afectar de los componentes y de esta forma determinar el comportamiento y tipo de desgaste.

#### 5. Impacto ambiental y económico de empaques de BOPP desechados

Para todos los valores numéricos escritos a continuación, se realizan **estimados** del valor real debido a temas de confidencialidad de la compañía. Inicialmente, como parte de la evaluación de las pérdidas en línea dos, se considera que para el año 2020 el costo por cada kilogramo de producto defectuoso y dado de baja por problemas de inocuidad es de 3.200 ¢/kg por referencia, variando levemente de acuerdo con el tipo de producto. Para el 2021, el costo aumento a 4.900 ¢/kg según los datos del departamento de Productividad y, por consiguiente, cada empaque desechado produce un costo que crece como una bola de nieve conforme pasa el tiempo.

En la compañía se emplea el concepto de Eventos de No Calidad, el cual representa también los inconvenientes que se dan en el proceso de sellado, relacionados principalmente a empaques dañados/quemados por problemas en el sello.

Realizando una trazabilidad y el análisis de los Eventos de No Calidad para el año 2021, se denotan un total de ocho acontecimientos mayores donde todos se atribuyen a pérdidas ocasionadas a las fallas y desajustes presentados en los sistemas de sellado en las empacadoras individuales. Estos sucesos produjeron una pérdida de ¢3.550.000 solo tomando en cuenta las unidades dadas de baja y el reproceso. Adicionalmente, en algunos proyectos de desarrollo de nuevos productos, de igual forma se han cuantificado pérdidas de hasta ¢12.000.000 por inconvenientes en el sellado de los empaques individuales, ya sea por la capacidad de sellado de los sistemas de mordazas de cada empacadora, por no lograr un ajuste o calibración óptima para la curva de sellado o debido a la implementación de materiales de empaque que no cumplan con los parámetros de sellado de las empacadoras.

De los mismos datos proporcionados por el departamento de Productividad, se cuantificó que los empaques desechados de CMI en los Eventos de No Calidad son de veinticinco mil cien, mientras que NO hubo Eventos de No Calidad para CCE. Es seguro que en los proyectos de desarrollo de nuevos productos aumentan el número de CMI, pero como no se logró obtener datos cuantitativos, no se tomarán en cuenta en la evaluación del impacto ambiental en este momento.

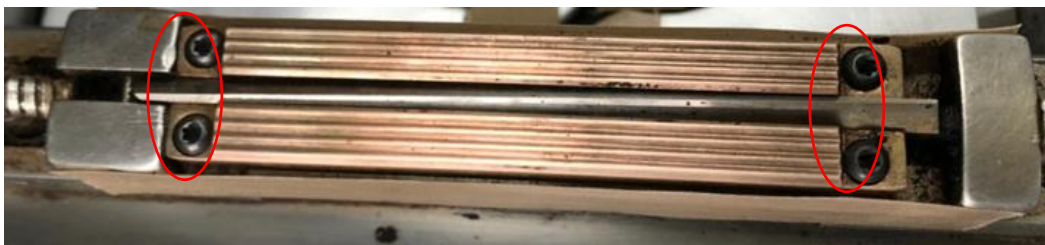
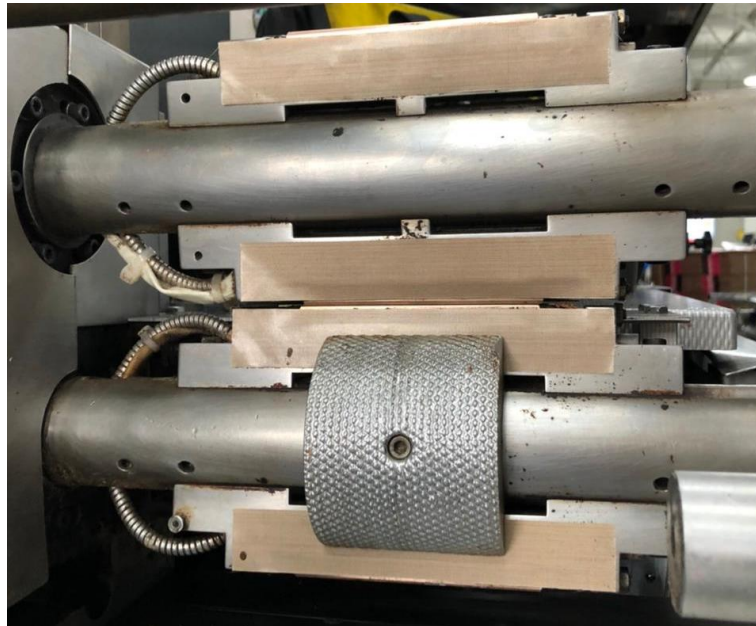
Asimismo, de acuerdo con el número de empaques desechados, se contabilizan un total de 31,70 g por empaque individual de producto y con los veinticinco mil cien empaques desechados esto equivaldría a 795,67 kg de producto rechazado y pérdidas de ¢3.765.000 según el precio que

se le ofrece al público por empaque individual al día 2 de marzo del 2022. La incorporación del sistema de celdas de carga llegaría a disminuir tanto la masa como el valor monetario perdido.

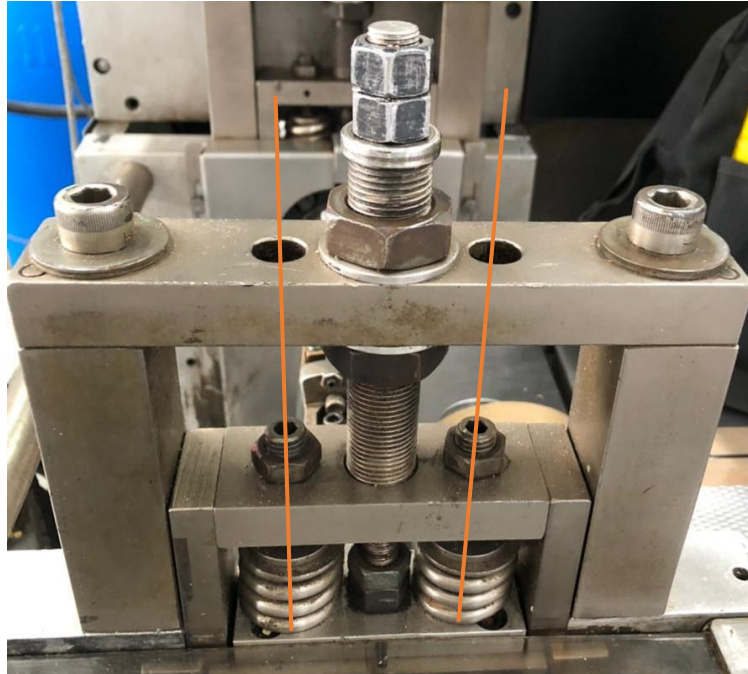
## IV. Resultados y su análisis

### 1. Componentes del sistema de sellos de la máquina *WM18 SynchroFlo 1*.

A continuación, se muestra la máquina donde se estará trabajando el proyecto. En la figura 8, se muestra el sistema de ejes, mordazas y tornillos de mordazas de la máquina *WM18 SynchroFlo 1* que se involucran para la determinación de los parámetros. En medio de los ejes y del par de mordazas es donde se confeccionan los sellos de EPG y por ende el área que se debe monitorear junto con el sistema de resortes de la figura 9.

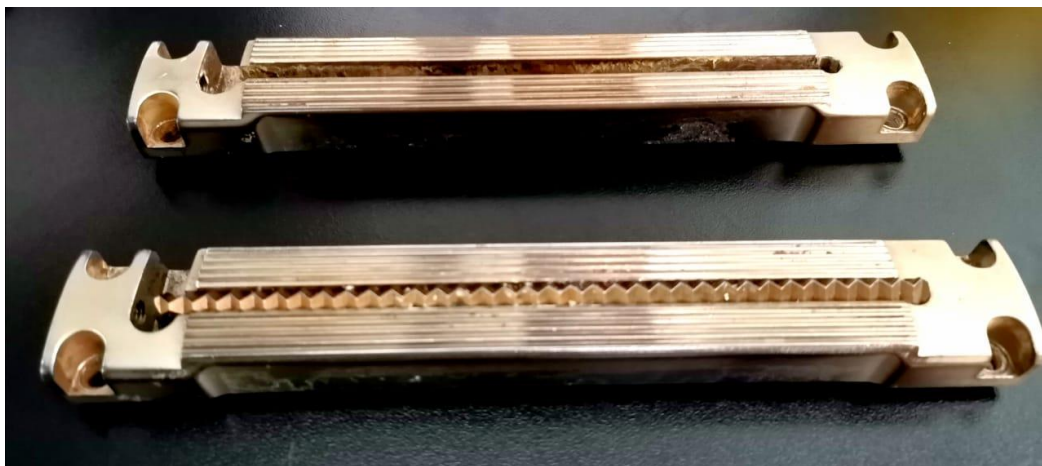


**Figura 8.** Ejes, mordazas y tornillos de mordazas (círculo rojo) de la *SynchroFlo 1*.



**Figura 9.** Tornillos y tuercas para el ajuste de la mordaza y sus componentes en la *SynchroFlo 1*.

Asimismo, el correcto ajuste que llegarían a facilitar los papeles llega a disminuir la problemática del desgaste superficial de las mordazas. Este se puede observar en la figura 10, en un par de mordazas que se encontraban en bodega y fueron sustituidas por desgaste, donde este se aprecia con una tonalidad sombreada en los dientes a comparación del resto de la mordaza. Se puede determinar fácilmente que es desgaste puesto que estas mordazas en particular no lograban realizar un sellado eficiente en su zona central.



**Figura 10.** Desgaste superficial en componentes reemplazados de la mordaza en la SynchroFlo.

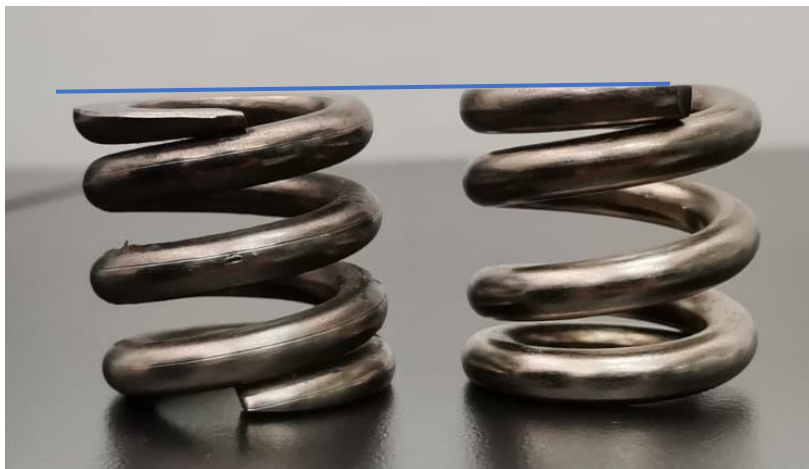
## 2. Prueba de compresión a resortes

Para la prueba empírica, el resorte viejo se colocó sobre una superficie plana y encima de este se ubicó la carga de 40 kg. Para determinar la constante de un resorte común, se emplea la siguiente fórmula:

$$k = \frac{F}{y}$$

Donde  $k$  se define como la constante del resorte;  $y$  es la diferencia entre la longitud del resorte en estado de reposo y la longitud del elemento sometido a una fuerza axial y  $F$  es la fuerza aplicada en Newtons (Shigley *et al.*, 2019).

Para hallar la longitud de este resorte, se realizaron tres medidas utilizando un pie de rey digital con tolerancia de  $\pm 0.01$  mm. Dichas medidas se realizaron solamente en un punto de toda la circunferencia del resorte, debido a que por la gran cantidad de tiempo que se ha viejo este presenta un leve desnivel en el último segmento del resorte y por ende una de sus caras, como se observa en la figura 11. Si se realizara mediciones de longitud y se toma en cuenta ese punto desnivelado, los valores obtenidos serían demasiado variables y al ser solamente una prueba empírica, no existe necesidad de complicar el ensayo.



**Figura 11.** Comparación de planitud de superficies entre el resorte antiguo (izquierda) y el resorte nuevo (derecha).

Sin la carga se obtuvo una altura promedio de  $(33.26 \pm 0.01)$  mm; y con la carga una altura promedio de  $(31.02 \pm 0.01)$  mm. Con estos valores y transformando la masa de 40 kg a unidades del SI (N), se calcula a continuación la constante del resorte viejo:

$$k_{viejo1} = \frac{F}{y} = \frac{40.00 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2}{(33.26 - 31.02) \text{ mm}} = 175.18 \text{ N/mm}$$

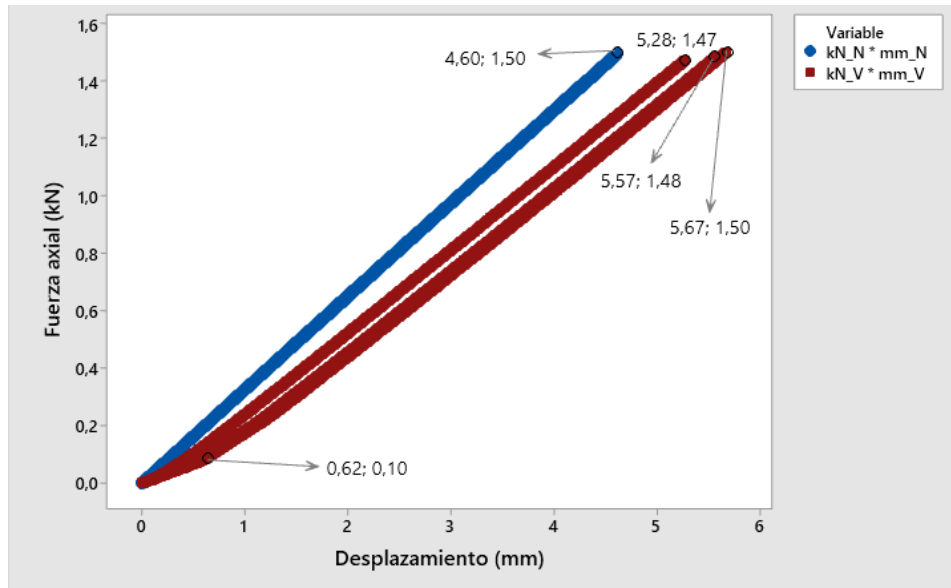
Posteriormente se midió la longitud del resorte en medio de su funcionamiento (en la SynchroFlo 1) con la misma metodología anterior, obteniendo un promedio de  $(27.01 \pm 0.01)$  mm. Aplicando la misma fórmula de la constante del resorte a continuación, se calcula la fuerza que la máquina SynchroFlo 1 le ejerce al resorte:

$$k = \frac{F}{y} \rightarrow F = k \times y = 175.18 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \times (33.26 - 27.01) \text{ mm} = 1094.87 \text{ N}$$

Con esta fuerza calculada de  $1094.87 \text{ N}$ , se tiene un estimado de cuanta fuerza aplicar en el ensayo de compresión del laboratorio empleando la máquina *MTS Bionix Axial/Torsional Tabletop Test Systems*, puesto que no se logró conseguir el valor de compresión máximo que se recomienda por efectos del proveedor.

En el ensayo de compresión del laboratorio, se realizaron tres pruebas por cada resorte para un total de seis, donde se iban alternando entre resortes y donde se empezó con el resorte viejo, dando así que el resorte viejo cae en los ensayos con números impares y el resorte nuevo con números pares. Cada prueba consistía en aumentar constantemente la fuerza aplicada a una tasa de 300 N/min hasta un máximo de 1500 N y recibir de acuerdo con esta un desplazamiento en el resorte, siendo entonces la fuerza aplicada la variable independiente y el desplazamiento la variable dependiente. Además, cabe resaltar que cada ensayo iniciaba con una precarga de 100 N. Al efectuar un diagrama de dispersión con los datos obtenidos de los ensayos, se obtuvieron los resultados de la figura 12.





**Figura 12.** Gráfica de dispersión de los ensayos de compresión en fuerza contra desplazamiento aplicados al resorte viejo (V, rojo) y al resorte nuevo (N, azul).

Inicialmente, si se escoge el punto (5.67; 1.50) en la figura 12, es posible calcular la constante del resorte viejo con datos más preciosos que de la forma empírica. Aplicando la misma fórmula, se tiene:

$$k_{viejo2} = \frac{F}{y} = \frac{1500 \text{ N}}{[33.26 - (33.26 - 5.67)] \text{ mm}} = 264.55 \text{ N/mm}$$

Con esto se comprueba que la constante del resorte encontrada con los 40 kg es errónea y se debió al movimiento inestable de los bloques cuando estaban encima del resorte, sumando el error humano al leer la medición de las alturas. Ahora, aplicando la misma idea al resorte nuevo, con una altura promedio de  $(34.80 \pm 0.01)$  mm, se obtiene el siguiente resultado:

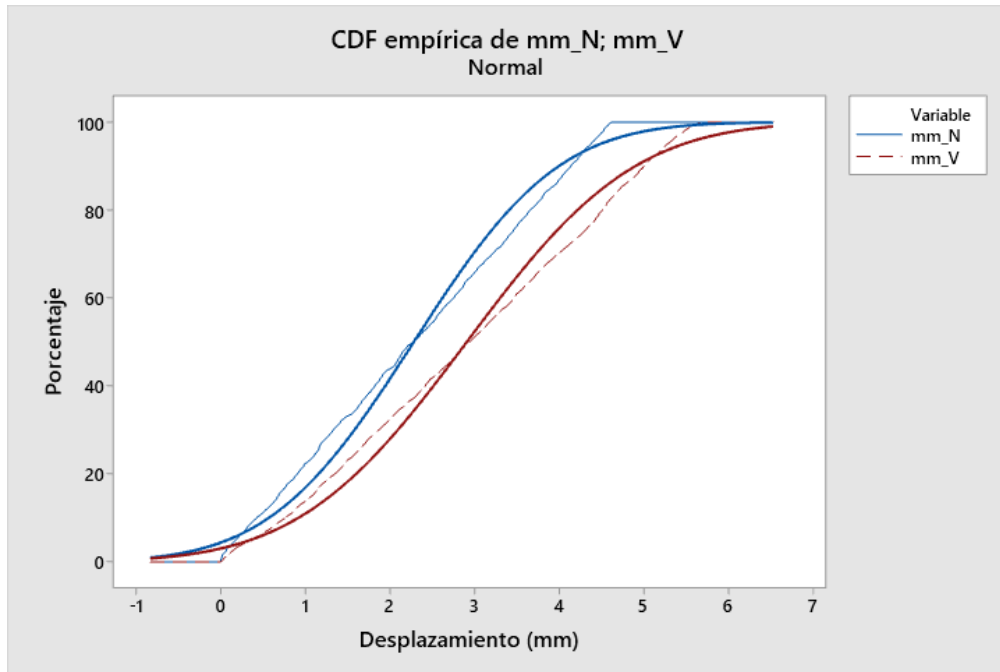
$$k_{nuevo} = \frac{F}{y} = \frac{1500 \text{ N}}{[34.80 - (34.80 - 4.61)] \text{ mm}} = 325.38 \text{ N/mm}$$

Ahora, al observar la figura 12, es evidente la diferencia de comportamiento entre el resorte nuevo y el usado. El resorte viejo tuvo una conducta inconsistente para los tres ensayos realizados, donde se obtuvo una diferencia de 0.1 mm de desplazamiento entre el ensayo tres y cinco; y otra diferencia de 0.39 mm entre el ensayo uno y cinco al tomar en cuenta el punto máximo de la gráfica y diferencias de fuerza en esos puntos de apenas 30 N.

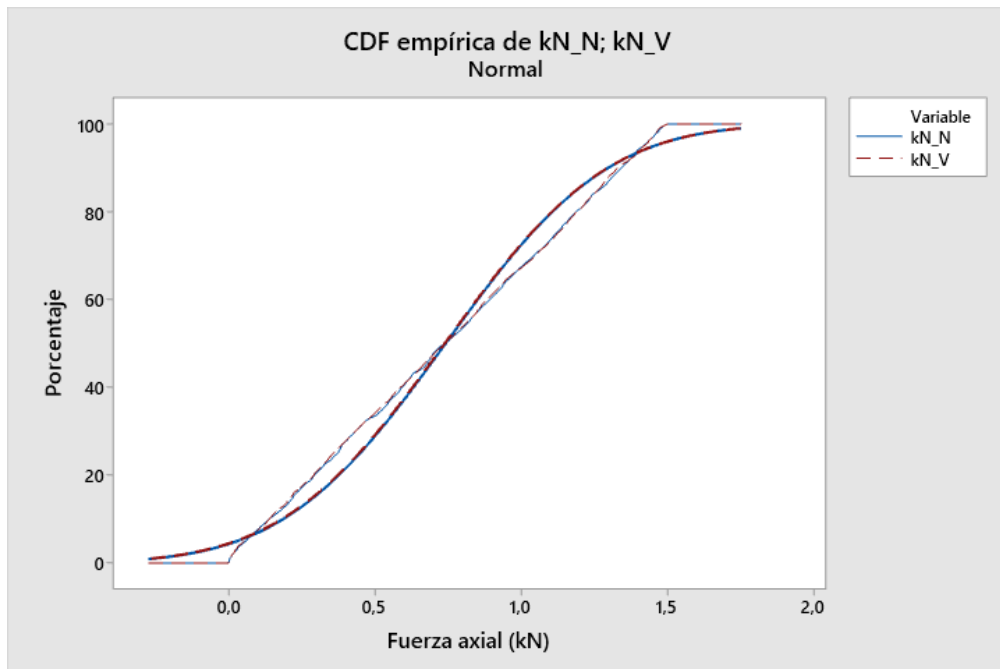
Además, se puede observar que el resorte presenta una curva inicial desde el punto cero hasta aproximadamente los 0.62 mm de desplazamiento. Esto se debe a la deformación del resorte viejo en su cara mostrado en la figura 11, puesto que, en el momento de la prueba, la placa o plato de la máquina de compresión que baja paulatinamente para confeccionar el ensayo toca primero la superficie del resorte que no está hundida y conforme se agrega más fuerza a la prueba, la placa palpa eventualmente la totalidad de la superficie y por ende necesitando de más fuerza para desplazar el objeto, coincidiendo con el comportamiento de la curva.

Al comparar los datos de desplazamiento entre los seis ensayos, así como los de la fuerza aplicada, se obtienen las curvas de la figura 13 y 14; y se emplea este tipo de gráfica CDF empírico para interpretar de una mejor forma los datos (Minitab, 2020).

En la figura 13 se demuestra la diferencia de desplazamiento que ocurre entre el resorte viejo y nuevo y el comportamiento que poseen ambas curvas. Por otro lado, en la figura 14 se aprecia que la fuerza aplicada por parte de la máquina es consistente para los seis ensayos y las curvas se traslapan casi perfectamente una de otra, demostrando la eficiencia del aparato en el proceso. Asimismo, en la figura 12 demuestra que el resorte nuevo y sin uso alguno se comporta exactamente igual para los tres ensayos realizados, donde inclusive las tres pruebas se traslapan una entre otras y no se distinguen. Las tres pruebas concluyeron con un desplazamiento máximo de 4.61 mm para 1500 N. Asimismo, se señala que, para un trabajo continuo de al menos veinticinco años, el resorte antiguo se desplaza 1.06 mm más (con 1500 N) que cuando estaba totalmente nuevo.



**Figura 13.** Gráfica de CDF empírica aplicada al desplazamiento obtenido de los seis ensayos de compresión para el resorte nuevo (N, azul) y el resorte viejo (V, rojo).



**Figura 14.** Gráfica de CDF empírica aplicada a la fuerza usada en los seis ensayos de compresión para el resorte nuevo (N, azul) y el resorte viejo (V, rojo).

Para efectos de su función, esta diferencia no representa un peligro para el sistema de mordazas si se habla exclusivamente del ajuste de resortes, en el sentido de que para llevar el resorte al estado de compresión (sin tomar en cuenta la fuerza que recibe por parte de los golpes de la máquina) se utiliza el tornillo/pin (2) como se muestra en la figura 9, el cual necesita pocas vueltas para aumentar o restar ese 1.06 mm de diferencia en la compresión.

Sin embargo, como se está ideando un sistema de control para presión y disminuir la variación en los EPG, una diferencia de 1.06 mm representaría demasiada variabilidad para conseguir este hito; y lo mismo aplica para las diferencias entre el  $k_{viejo2}$  y  $k_{nuevo}$ . Por lo tanto, es imprescindible no mezclar resortes nuevos con resortes viejos en el sistema de mordazas y para obtener una estimación de cada cuanto tiempo se deben cambiar los resortes, primero se debe encontrar y controlar la fuerza o presión óptima para los empaques y luego usar esa fuerza óptima y determinar un límite o parámetro estandarizado que indique cuando cambiar los resortes.

### 2.1. Resistencia de las piezas ante la carga transmitida desde el resorte

Es muy importante evaluar si los componentes que se implementen en el sistema vayan a resistir la fuerza recibida desde las mordazas a los resortes y el resto de las piezas. Para ello, primero es necesario calcular la verdadera fuerza que ejerce cada resorte como reacción en la SynchroFlo, empleando  $k_{viejo2}$  y  $k_{nuevo}$  con la distancia de compresión que se había medido en medio funcionamiento:

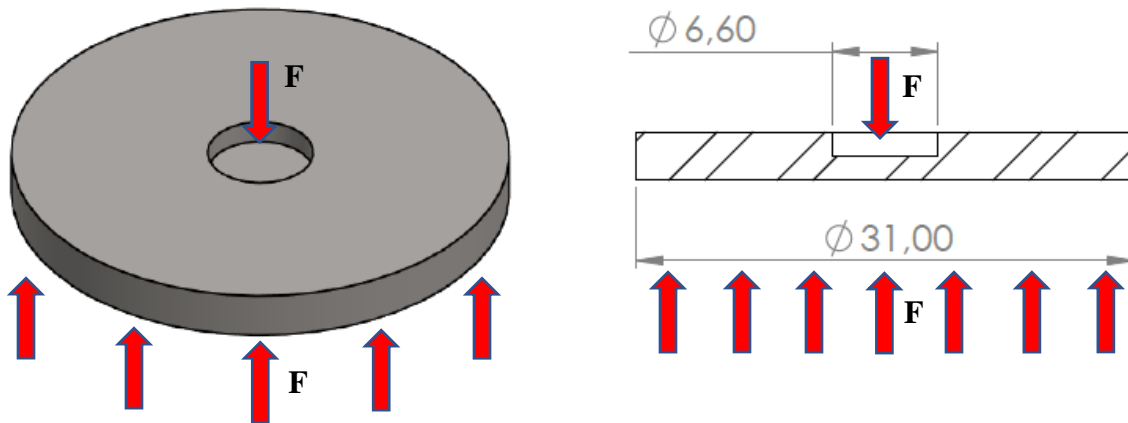
$$k = \frac{F}{y} \rightarrow F = k_{viejo2} \times y = 264.55 \frac{N}{mm} \times (33.26 - 27.01) mm = 1653.44 N$$

$$k = \frac{F}{y} \rightarrow F = k_{nuevo} \times y = 325.38 \frac{N}{mm} \times (33.26 - 27.01) mm = 2033.62 N$$

Con los resultados anteriores, se demuestra que la fuerza real aplicada al resorte viejo (actual) es de 1653.44 N y al someter eventualmente al resorte nuevo a una misma distancia de

compresión, este trabajaría y ejercería una fuerza de 2033.62 N. Sin embargo, se debe recordar que una vez obtenido el sistema de control de fuerza/presión con las celdas de carga, la idea es realizar un experimento y comprobar con diferentes valores cual es la fuerza o el rango de fuerza que permita conseguir los sellos de EPG óptimos y no son necesariamente los dos valores anteriormente obtenidos, pero si valores cercanos. Con esto en mente, se pretende obtener como mínimo un factor de seguridad de 2 una vez escogido el material de las piezas (3') y (4) que se implementan en el sistema.

El *puck* (5) y la celda de carga (6) ya vienen con un material predeterminado y con su ficha técnica preestablecida. Con respecto a (6), esta posee la capacidad para medir hasta 31138 N o 7000 lb, por lo cual, para la carga en la SynchroFlo que ni siquiera alcanza los 10000 N por resorte, está en la capacidad del sistema diseñado. Ahora con respecto a (3') y (4), estas se escogieron de un acero AISI 1020 con resistencia a la fluencia de 295 MPa en su estado recocido, siendo un material dúctil en este caso y además posee un bajo costo de adquisición (ASM International, 1998).



**Figura 15.** Vista isométrica y DCL del cilindro guía (4).

En la figura 15 se muestra un diagrama de cuerpo libre (DCL) para plantear las fuerzas que están interactuando con (4), puesto que es la pieza de sección transversal crítica del sistema. Se evidencia que la pieza está a compresión con dos direcciones opuestas, pero internamente estará sometida solo a la fuerza que es la que transmite el resorte. Asumiendo que se trabajará con la fuerza de 2033.62 N y con un diámetro de 35.00 mm para (3') y 31.00 mm para (4), se calcula el esfuerzo nominal al que estará el sistema:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{2033.62 \text{ N}}{\frac{\pi}{4} (35.00 \text{ mm})^2} = 2.11 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{2033.62 \text{ N}}{\frac{\pi}{4} (6.60 \text{ mm})^2} = 59.44 \text{ MPa}$$

Luego de esto, se evidencia que no es necesario invertir en un material con mayor resistencia puesto que el sistema no estará sometido a un esfuerzo de compresión lo suficientemente elevado para llegar a la fluencia. Al buscar el factor de seguridad del sistema para la condición crítica, se obtiene:

$$F.S. = \frac{295.00 \text{ MPa}}{59.44 \text{ MPa}} = 4.96$$

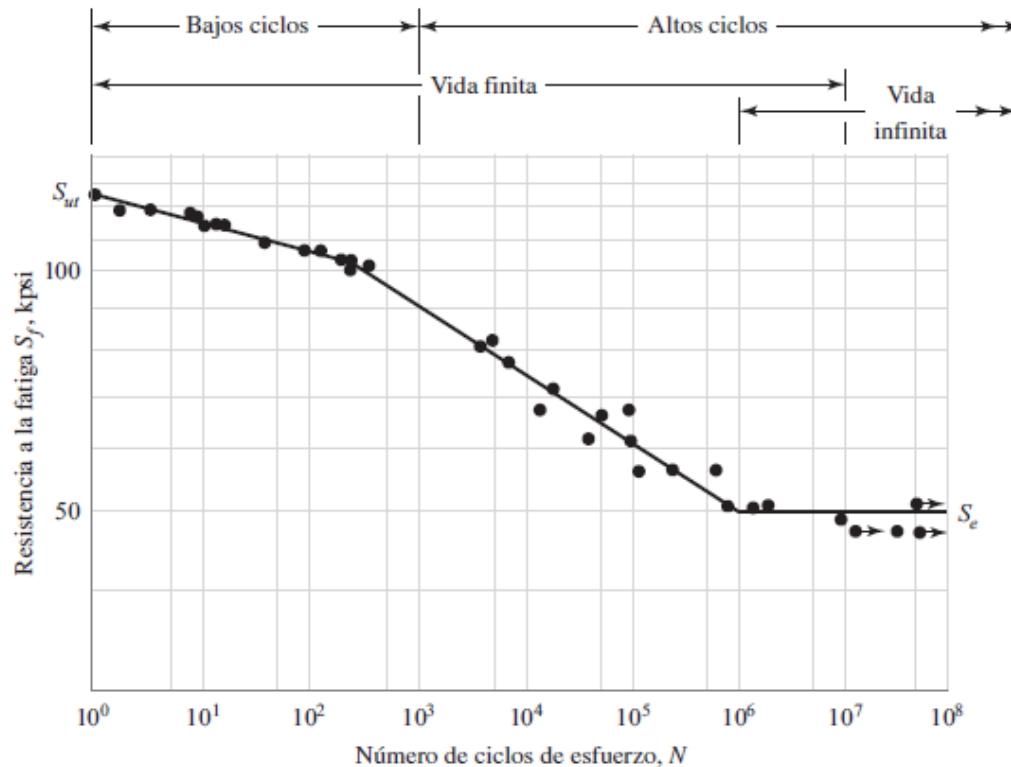
Un factor de seguridad de 4.96 indica una alta seguridad del sistema diseñado. Sin embargo, este análisis está incompleto debido a que estos cálculos están basados en un desarrollo estático y el sistema de resortes está funcionando ante cargas dinámicas. Para determinar la resistencia a la fatiga de un material, en ocasiones es necesario un gran número de pruebas o se realizan diversos supuestos como la existencia de una grieta que empezará a extenderse y propiciar la falla por fatiga. Por dicha razón, los ensayos de fatiga suelen tener una alta dispersión e inclusive es complicado determinar un rango para el límite de resistencia a la fatiga.

## 2.2. Análisis dinámico ante la carga transmitida

A pesar de lo mencionado en el punto anterior, se han creado métodos que estiman los límites de resistencia a la fatiga. El límite varía de acuerdo con el material y como se posee un acero AISI 1020 en este caso, se toma el límite de resistencia a la fatiga ( $S_e$ ) como  $0.5S_{ut}$  para aceros con una  $S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi}$  ( $1400 \text{ MPa}$ ); o  $700 \text{ MPa}$  para aceros con  $S_{ut} > 1400 \text{ MPa}$  (Shigley *et al.*, 2019). Para el AISI 1020, se tiene una resistencia última ( $S_{ut}$ ) de 395 MPa, por lo cual su límite a la fatiga sería:

$$S'_e = 0.5S_{ut} = 0.5 \times 395 \text{ MPa} = 197.5 \text{ MPa}$$

Este límite afectará el número de ciclos que pueda soportar la pieza antes de fallar por fatiga. Dependiendo del número de ciclos, la pieza se puede considerar de alto ciclaje o de bajo ciclaje; así como de vida finita o vida infinita. Esta comparativa se observa de manera gráfica en la figura 16.



**Figura 16.** Diagrama  $S$ - $N$  graficado a partir de ensayos de fatiga axial para un acero UNS G41300 normalizado (Shigley *et al.*, 2019).

Para determinar el número de ciclos y una estimación más acertada de la resistencia a la fatiga de una pieza, se emplea la siguiente ecuación:

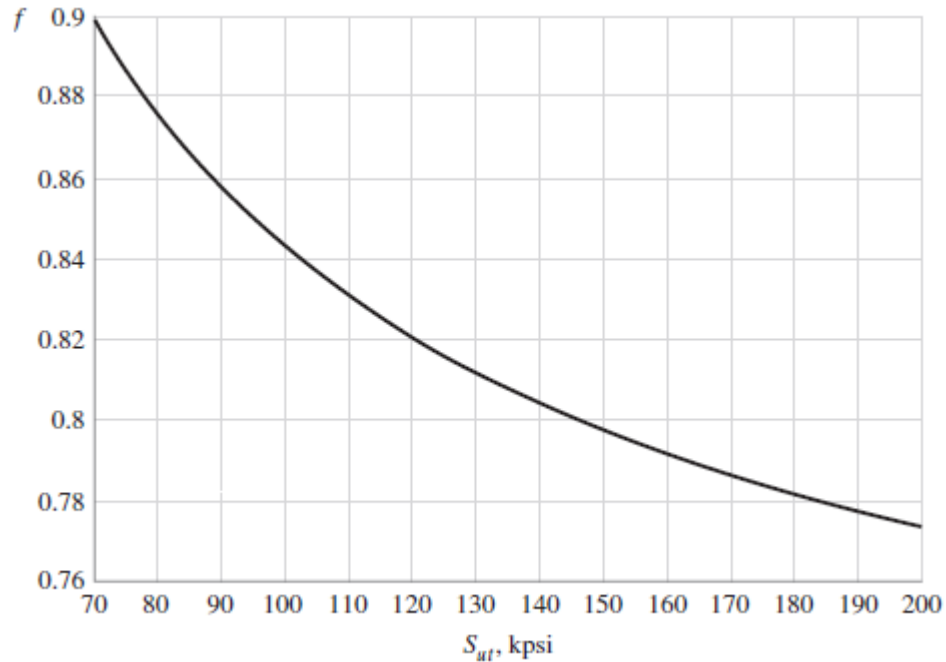
$$S_f = aN^b$$

Donde  $S_f$  es la resistencia a la fatiga,  $N$  es el número de ciclos que la pieza soportará y  $a$  y  $b$  se definen de la siguiente forma:

$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S'_e}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{f S_{ut}}{S'_e}\right)$$

Y donde  $f$  se define como la fracción de resistencia a la fatiga de  $S_{ut}$  (Shigley *et al.*, 2019). Para hallar  $f$ , se emplea la figura 17 mostrada a continuación.



**Figura 17.** Fracción de resistencia a la fatiga ( $f$ ) de  $S_{ut}$  a los  $10^3$  ciclos para  $S_e = 0.5 S_{ut}$  a los  $10^6$  ciclos (Shigley *et al.*, 2019).

El acero AISI 1020 posee un  $S_{ut}$  de 57.3 kpsi (395 MPa), por lo cual su fracción de resistencia se tomará como 0.9. Para encontrar el valor del número de ciclos  $N$  sería necesario tener el dato de la resistencia a la fatiga del material ya tabulada o registrada y debido a que los valores son tan variables independientemente de cuándo o donde se haga el experimento, es muy difícil encontrar dicho dato. Por lo cual, se buscará la resistencia a la fatiga para  $10^3$  ciclos y  $10^6$  ciclos, respectivamente:

$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S'_e} = \frac{(0.9 \times 395 \text{ MPa})^2}{197.5 \text{ MPa}} = 639.9 \text{ MPa}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{f S_{ut}}{S'_e}\right) = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{0.9 \times 395 \text{ MPa}}{197.5 \text{ MPa}}\right) = -0.085$$

$$S_f = aN^b = 639.9 \text{ MPa} \times (10^3)^{-0.085} = 355.7 \text{ MPa}$$



$$S_f = aN^b = 639.9 \text{ MPa} \times (10^6)^{-0.085} = 197.7 \text{ MPa}$$

Se puede resaltar que, para el periodo de  $10^3$  ciclos, la resistencia a la fatiga está superando la resistencia a la fluencia del material. Para el caso de  $10^6$  ciclos, la resistencia a la fatiga está casi 100 MPa por debajo del límite a la fluencia. Debido a que el esfuerzo máximo al que trabajará la sección crítica de las piezas no llega ni a los 100 MPa y como se ha estimado con diversos experimentos que a partir de los  $10^6$  ciclos los aceros toman un comportamiento lineal en las gráficas  $S-N$ , se puede afirmar que las piezas estarían diseñadas para un alto ciclaje y para una vida infinita.

### 2.3. Factores que afectan la resistencia a la fatiga del sistema

Adicionalmente, existen algunos factores que vienen a influir en la resistencia a la fatiga del material, tales como: manufactura, variables en el entorno de trabajo y factores en el diseño. Los factores propiamente son calidad superficial, tamaño de la muestra, carga aplicada, temperatura de trabajo, confiabilidad del sistema y sensibilidad de la muesca.

En este caso, el único aspecto que no viene a influir es el de sensibilidad e la muesca, puesto que la pieza de condición crítica no es poseedora de una. Por lo cual, se plantea la siguiente fórmula, llamada fórmula de Marin, para obtener la influencia de estos factores sobre la resistencia a la fatiga:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e$$

Donde  $k_a$  representa el factor de calidad superficial,  $k_b$  el de tamaño de muestra,  $k_c$  el del tipo de carga aplicada,  $k_d$  el de la temperatura de trabajo y  $k_e$  el de confiabilidad del sistema (Shigley *et al.*, 2019).

Para  $k_a$ , se emplea la siguiente fórmula:

$$k_a = aS_{ut}^b$$

Los valores de  $a$  y  $b$  se consiguen por medio de la tabla 1 mostrada a continuación.

**Tabla 1.** Valores de  $a$  y  $b$  para calidad superficial ( $k_a$ ) en la fórmula de Marin (Shigley *et al.*, 2019).

Acabado superficial	Factor $a$		Exponente $b$
	$S_{ut}$ , kpsi	$S_{ut}$ , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Como las piezas fueron maquinadas, se tiene:

$$k_a = 4.51 \times 395^{-0.265} = 0.924$$

Seguidamente, se calcula el factor de tamaño para el sistema. En este caso, este factor depende del tipo de carga que se esté aplicando y para carga axial el valor de  $k_b = 1.000$ .

Ahora, para el tipo de carga aplicada como tal ( $k_c$ ), se emplean valores puntuales y para carga axial,  $k_c = 0.85$ .

Continuando con el aspecto de temperatura ( $k_d$ ), este se encuentra al utilizar la siguiente fórmula:

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}}$$

Donde  $S_T$  es la resistencia a la tensión a la temperatura de operación y  $S_{RT}$  es su resistencia a la tensión a la temperatura de trabajo. Adicionalmente, se puede emplear la tabla 2 como método de apoyo.

**Tabla 2.** Efectos de la temperatura de trabajo en la resistencia del acero  
(Shigley *et al.*, 2019).

Temperatura, °C	$S_T/S_{RT}$	Temperatura, °F	$S_T/S_{RT}$
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

En este caso, como la temperatura en el sistema de resortes y el cilindro guía (4) no supera los 50 °C, se toma  $k_d = 1.000$ .

La última incógnita por evaluar es el factor de confiabilidad, la cual por factores de seguridad se toma con la menor confiabilidad posible de un 50%. Esto atribuye un valor de  $k_e = 1.000$ .

Con todos los datos demostrados, se resuelve la fórmula para la nueva resistencia a la fatiga:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e = (0.924)(1)(0.850)(1)(1)(197.5 \text{ MPa}) = 155.116 \text{ MPa}$$

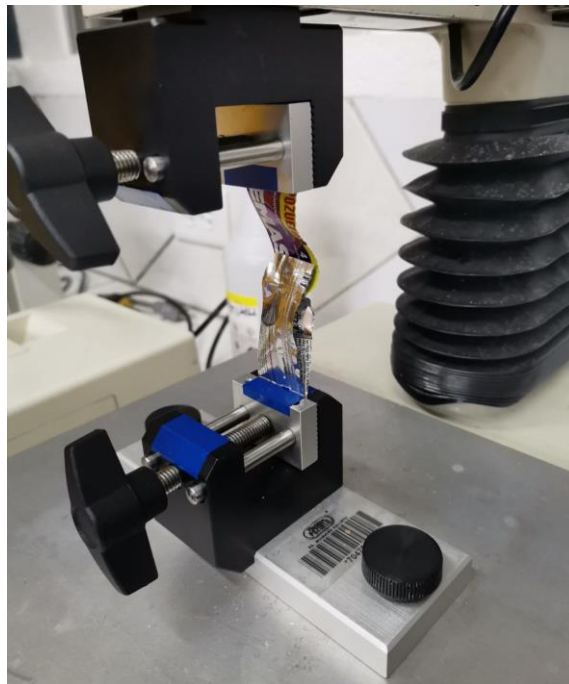
A pesar de que con los factores evaluados se disminuyó una cantidad más el límite a la fatiga del cilindro guía (4), este sigue estando casi 100 MPa por encima del esfuerzo nominal al que trabaja la pieza, por lo cual se sigue demostrando que la pieza posee una vida infinita.

### 3. Control de parámetros en mordazas

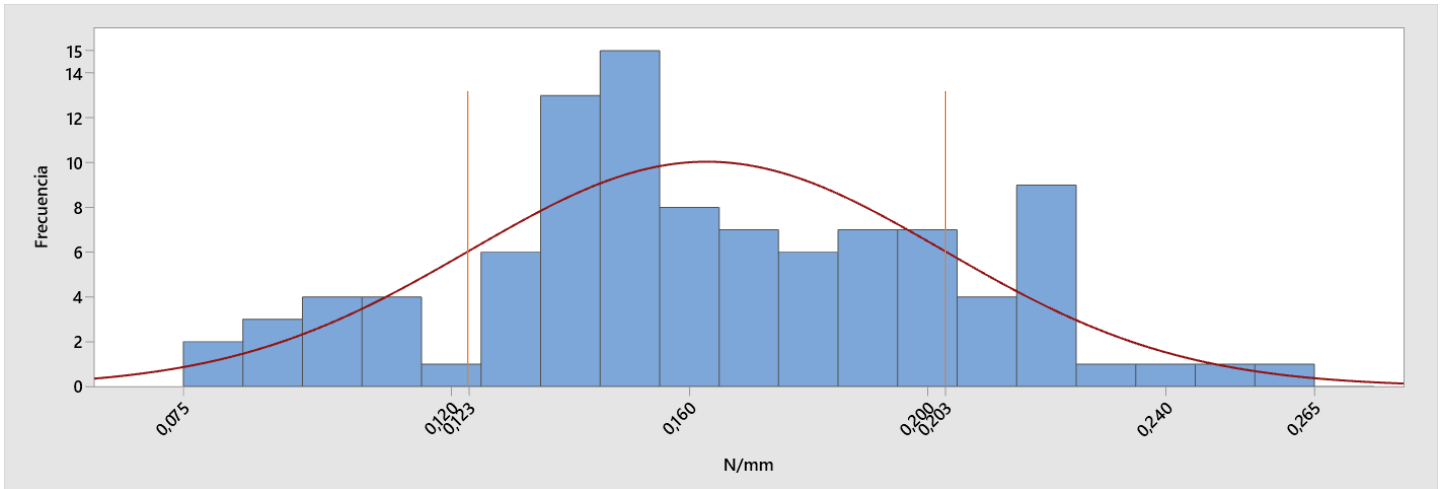
#### 3.1. Pruebas efectuadas previo a la implementación de las celdas de carga

Inicialmente, se acumularon los cien empaques de CMI y cien de CCE, los cuales se sometieron a pruebas de fuerza en el texturómetro de acuerdo con la norma *ASTM F88*. De esta forma, la prueba consiste en conseguir un corte rectangular del empaque polimérico con dimensiones de 76 mm (3 pulg.) de largo y 25,4 mm (1 pulgada) de ancho y donde las unidades de medición son de N/mm. Como se muestra en la figura 18, la probeta se coloca en el texturómetro utilizando dos mordazas en los extremos de la probeta y se aplica una fuerza de tensión para determinar el valor máximo de fuerza para el sello.

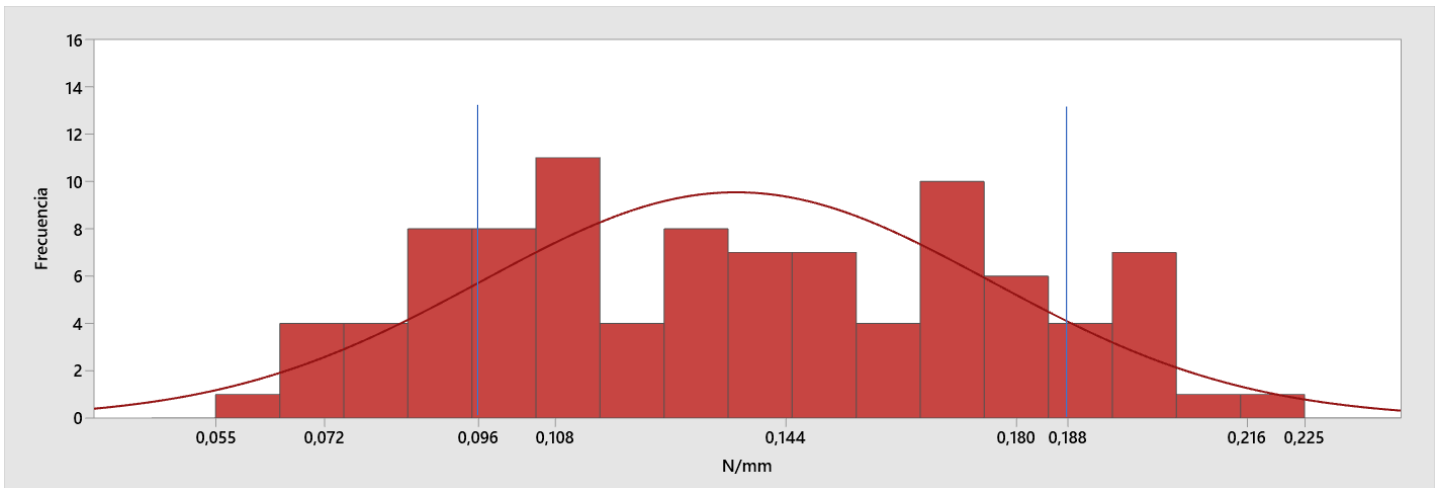
Posteriormente, los valores obtenidos se graficaron en un histograma y se aplicó un análisis de estadística descriptiva en los datos. Los histogramas se pueden apreciar en la figura 19 y 20.



**Figura 18.** Probeta polimérica y equipo empleado para ensayo de tensión según norma *ASTM F88*.



**Figura 19.** Histograma de fuerzas de sello para la referencia de CCE.



**Figura 20.** Histograma de fuerzas de sello para la referencia de CMI.

Asimismo, el análisis de estadística descriptiva se muestra en la tabla 3. En la sección del Marco Teórico se había mencionado que la referencia de CCE poseía un espesor de 20  $\mu\text{m}$ , mientras que la de CMI tenía 27,5  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, en el caso de la segunda referencia, este producto se divide en dos capas: la termosellable con dimensión de 15  $\mu\text{m}$  y la no termosellable de 12,5  $\mu\text{m}$ .

Con esto en mente, se puede observar en la tabla 3 que mientras mayor sea el espesor de la capa termosellable de la muestra, así también será la fuerza por cada milímetro necesaria para

conseguir una buena calidad del sello; aunque también se asume que, debido a la doble capa, la desviación estándar de las pruebas y el rango entre el valor máximo y mínimo es aumentado.

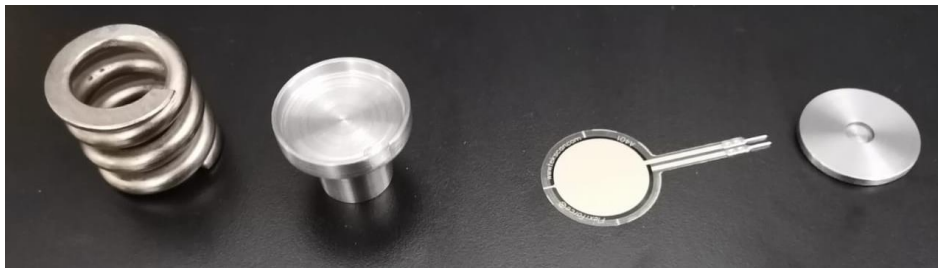
**Tabla 3.** Análisis estadístico obtenido del ensayo de tensión a las probetas de CCE y CMI.

Referencia	Media (N/mm)	Desv. Est. (N/mm)	Max (N/mm)	Min (N/mm)	LI (N/mm)	LS (N/mm)
CCE	0,163	0,040	0,258	0,081	0,123	0,203
CMI	0,142	0,046	0,268	0,057	0,096	0,188

Según datos obtenidos del proveedor de empaque polimérico de estos productos y siguiendo la norma *ASTM F88*, la fuerza por cada milímetro necesaria para CCE es de 0,200 N/mm y para CMI es de 0,160 N/mm a 40 psi, 135 °C y 0,5 s de contacto con la mordaza (Oben Group, n.d.). Según el promedio, a los empaques les faltaría 0,037 N/mm y 0,018 N/mm respectivamente para llegar a ese valor ideal, pero es importante poner en mesa que los valores del proveedor se obtuvieron en un ambiente controlado (laboratorio) con los parámetros anteriores y el ambiente en la línea dos varía debido a la necesidad de producción, con una temperatura en las mordazas de 160 °C y 0,2 s de contacto (300 productos/min) para CMI y 130 °C con 0,18 s de contacto (340 productos/min), por lo cual se puede inferir que se sacrifica tiempo de contacto con tal de aumentar la temperatura del sistema y por lo tanto así también cambiará la media de la fuerza por cada milímetro obtenida.

Finalmente, los límites inferiores y superiores para cada referencia (señalados en las figuras 19 y 20 con un par de líneas verticales) indican el rango donde se desea que los valores de fuerza, obtenidos en las pruebas posteriores a la instalación de las celdas de carga, se encuentren y que estén adaptados a las altas velocidades de la línea de producción. Esto con el fin de disminuir la variabilidad del sistema y apuntar al proceso de mejora continua.

Al concluir estas pruebas, ya es posible instalar el sistema de resortes y las celdas de carga, tal y como se observan en la figura 21, en la máquina *SynchroFlo 1* de la figura 22. Al hacer resto, ya se puede observar los valores de fuerza que el técnico coloca en los ajustes para que el proceso esté controlado. En la figura 23 se aprecia que esta cantidad ronda los 1200 N o 120 kg.



**Figura 21.** Sistema de resorte y celdas de carga a colocar en la *SynchroFlo 1*.



**Figura 22.** Sistema de resortes y celdas de carga instalados en la máquina *SynchroFlo 1*.



**Figura 23.** Valores de presión en el sistema de resortes y celdas de carga en tiempo real.

#### 4. Procedimiento para el ingreso de parámetros

Con la instalación de estas pantallas, ahora sí es posible para el operario ajustar el ingreso de parámetros de una manera más eficiente y visual. Para efectos de la velocidad de la línea o los paquetes por minuto en la línea y la temperatura de las mordazas, el personal utilizaba botones que le permitían aumentar o disminuir el valor de dicho parámetro para colocarlo donde creyera pertinente y según el tipo de polímero empleado, que son los valores del punto 2.2 de esta sección y tenían una pantalla para visualizar estos valores en tiempo real.

Y ahora, con la instalación de las celdas de carga y el sistema de medición, también tienen una pantalla donde pueden visualizar más fácilmente, en tiempo real y con buena precisión cuanto están aumentando o disminuyendo la presión al ajustar o desajustar los tornillos del sistema de mordazas, en lugar de realizarlo incómodamente por la posición, utilizando solamente la vista, pie de rey y sin saber la realidad de la fuerza aplicada.

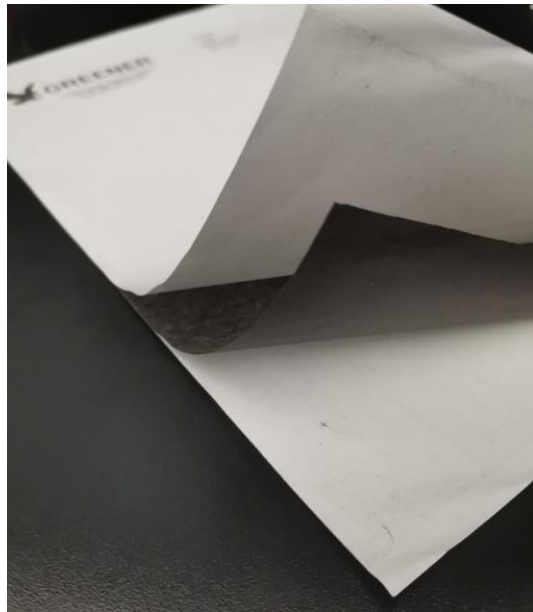
Esto además de disminuir los posibles problemas por desajuste, disminuye el tiempo en que el personal debe ajustar el sistema de mordazas, lo cual aumenta la productividad en general de la línea.



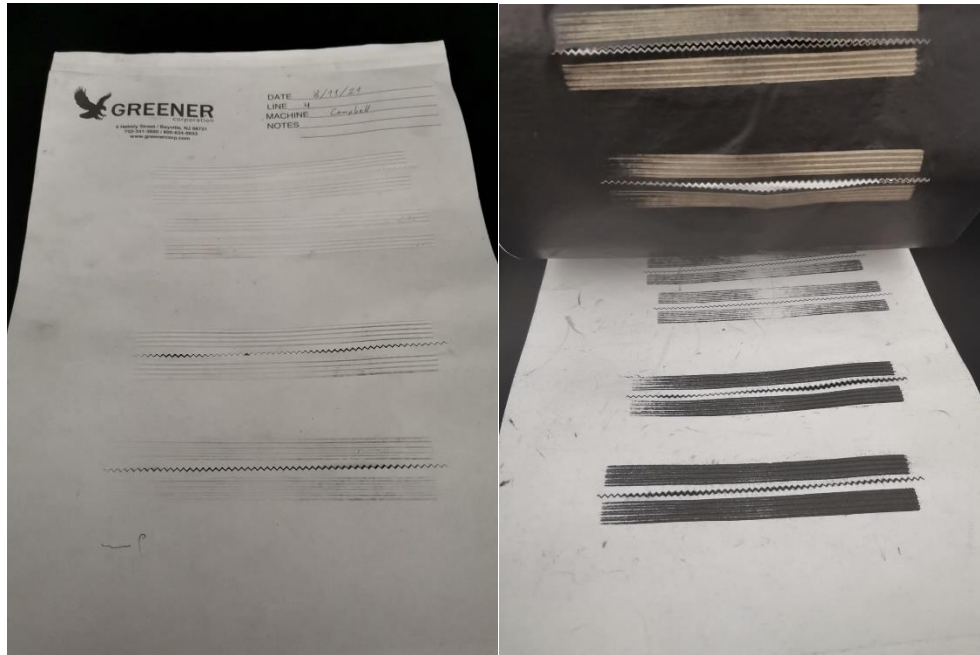
## 5. Ajuste con papel carbón y papel sin carbón

Al emplear las hojas de papel carbón y papel sin carbón previo a las pruebas en lugar de una hoja regular para el ajuste de mordazas, se evidenció la gran diferencia que se logra en la marca del sello. Inicialmente, se realiza el ajuste en frío de las mordazas por lo cual se emplea el papel carbón. Aquí se muestra que la hoja para la prueba está compuesta de tres partes: hoja regular, hoja o papel carbón y hoja regular nuevamente (figura 24), por lo que se puede tomar el sistema como un “sándwich”.

Las marcas impregnadas tanto en la hoja frontal/regular como con la marca de carbón se pueden observar en la figura 25, donde se ve que en la hoja del frente o la hoja regular si se marca el relieve de las mordazas y se hace el corte por parte de la cuchilla.



**Figura 24.** Sistema de hojas empleadas para el ajuste de mordazas en frío.



**Figura 25.** Demostración de las marcas engañosas en la hoja regular (izquierda) y buena interpretación de las marcas (derecha) para el ajuste en frío de las mordazas.

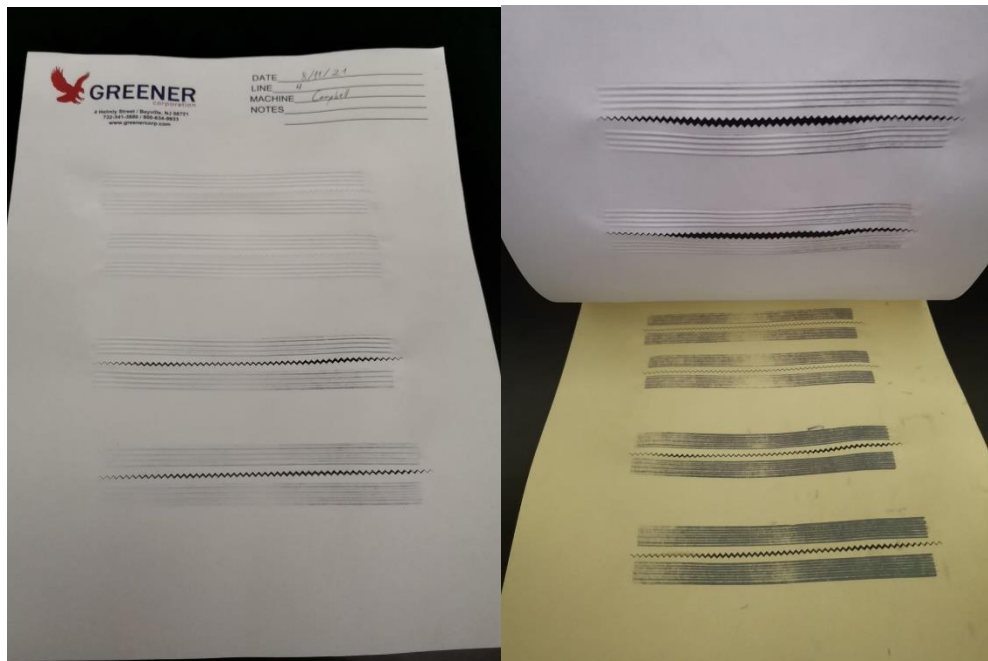
Dichas estampadas dan la impresión de que las mordazas están bien ajustadas, pero al compararlas con las marcas de carbón, se evidencia que usar hojas comunes dan una señal visual embustera. Las marcas de carbón superiores demuestran que falta un aumento de presión entre mordazas y las marcas inferiores indican una sobrepresión del lado derecho de la mordaza con una leve falta de presión del lado izquierdo.

Seguidamente, se realizó el ajuste en caliente de las mordazas usando el papel sin carbón compuesto en dos partes: hoja regular y hoja o papel sin carbón de color amarillo, el cual se muestra en la figura 26. Para esta ocasión se observó exactamente el mismo comportamiento que el ajuste en frío, o sea, marcas por el relieve y la cuchilla de las mordazas en la hoja regular que dan una buena impresión inicial y marcas en la hoja sin carbón que evidencian la falta de presión en el ajuste superior y la sobrepresión del ajuste inferior, junto con lo engañosas que son las marcas iniciales. Lo anterior se logra ver en la figura 27.



**Figura 26.** Sistema de hojas empleadas para el ajuste de mordazas en frío.

En este caso, ambas pruebas se realizaron el 8 de noviembre de 2021 y se continuó el uso del papel durante todos los ensayos realizadas. Este tipo de indicaciones son imposibles de detectar al usar las hojas convencionales y asegura que usarlas es peligroso, por lo cual se asegura que usar este método y equipo para el ajuste de las mordazas es efectivo.



**Figura 27.** Demostración de las marcas engañosas en la hoja regular (izquierda) y buena interpretación de las marcas (derecha) para el ajuste en caliente de las mordazas.

## V. Conclusiones

La variable de presión entre las mordazas se puede controlar correctamente con un aproximado de 1200 N en todas las mordazas al emplear un sistema de medición de buena tecnología y bien calibrado. Con esto se logra mejorar todo el proceso en los puntos de tiempo y dinero.

Se determinó que los parámetros actuales solo se controlaban parcialmente, lo cual producía una ineficiencia en el proceso que causaba una regularidad de empaques desechados. Sin embargo, también se llegó a la conclusión que los parámetros que sí se estaban controlando logran que el promedio de la fuerza de sello en la línea se encuentre muy cercano a la fuerza establecida en las fichas técnicas de 0,160 N/mm para CMI y 0,200 N/mm para CCE.

La implementación de un fácil procedimiento para el ingreso de parámetros en la máquina permite un aumento de productividad en la línea al disminuir el tiempo de ajuste en que el operario debe aumentar o disminuir la fuerza que se coloca en el sistema de mordazas.

Al no controlar el parámetro de presión del proceso, se producen eventualmente sellos deficientes tanto en CMI como en CCE que se alejan mucho del promedio de 0,142 N/mm y 0,163 N/mm obtenidos y por ende de los límites de control inferior y superior.

Se llegó a la conclusión que la estandarización y replicación de este sistema en las demás líneas de producción logrará como mínimo disminuir el ajuste que el operario deba realizar en el sistema de mordazas y la productividad, pero también puede alcanzar a mejorar el desempeño económico y ambiental puesto que se disminuyen los desechos al realizar el estudio pertinente para los tipos de polímeros de estas líneas de producción.

## VI. Recomendaciones

Se recomienda implementar una simulación de esfuerzos si se piensa rediseñar alguna pieza de las otras líneas de producción, como un segundo seguro además de los cálculos realizados manualmente. Sin embargo, esta simulación debería ser realizada por una persona con buena experiencia y por lo tanto cabe la posibilidad de que se deba conseguir un contratista para ello, aumentando el costo del proyecto.

Se aconseja que los papel carbón y papel sin carbón se sigan utilizando para el ajuste en frío y caliente posterior a este proyecto, puesto que se evidenció la gran diferencia de huella entre estos dos y el papel convencional, permitiendo realizar ajustes mucho más precisos.

Se sugiere tener componentes mecánicos y celdas de carga de respaldo, por si en algún momento alguna falla por algún inconveniente no relacionado al diseño y así perder la menor cantidad de tiempo con el reajuste y la línea detenida.

Es recomendable sustituir el acero AISI 1020 por algún acero inoxidable para los componentes rediseñados en el sistema de mordazas, puesto que de esta forma se protege en un grado mayor la inocuidad del producto alimenticio.

Es aconsejable diseñar un sistema de medición más “robusto” que el actual, en el sentido de que el existente es muy susceptible a errores humanos y por cualquier accidente las celdas pueden ser rotas o desgarradas en menor o mayor magnitud, incurriendo en paros de línea y pérdidas económicas en varios sentidos.

Es sugerible la implementación de una regleta de calibración en el sistema de mordazas, que permita el cambio rápido de celdas de carga para mantener la pérdida de tiempo lo más mínima posible.

Se recomienda establecer un lapso o deformación límite para los resortes para ser sustituidos cuando lleguen a este, con el fin de mantener la variabilidad del proceso al mínimo posible y la estandarización al máximo.

## VII. Bibliografía

- Abram, N. J., McGregor, H. V., Tierney, J. E., Evans, M. N., McKay, N. P., Kaufman, D. S., Thirumalai, K., Martrat, B., Goosse, H., Phipps, S. J., Steig, E. J., Kilbourne, K. H., Saenger, C. P., Zinke, J., Leduc, G., Addison, J. A., Mortyn, P. G., Seidenkrantz, M. S., Sicre, M. A., ... Von Gunten, L. (2016). Early onset of industrial-era warming across the oceans and continents. *Nature* 2016 536:7617, 536(7617), 411–418. <https://doi.org/10.1038/nature19082>
- Aiyengar, R., & Divecha, J. (2012). Experimental and statistical analysis of the effects of the processing parameters on the seal strength of heat sealed, biaxially oriented polypropylene film for flexible food packaging applications. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 28(3), 244–256. <https://doi.org/10.1177/8756087912440000>
- Askeland, R., Fulay, P., & Wright, W. (2012). *Ciencia e Ingeniería de Materiales* (6th ed.). Cengage Learning. <https://www.libreriaingeniero.com/2020/09/ciencia-e-ingenieria-de-materiales-donald-r-askeland-6ta-edicion.html>
- ASM International. (1998). Mechanical Properties of Carbon and Alloy Steels. *Metals Handbook Desk Edition*, 219–225. <https://doi.org/10.31399/ASM.HB.MHDE2.A0003093>
- ASTM. (2021). *ASTM F88/F88M-15, Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Materials*. 1–11. <https://doi.org/10.1520/F0088>
- Autodesk. (2021). *Inventor Software*. <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- Baughman, R. H. (1974). Solid-state synthesis of large polymer single crystals. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 12(8), 1511–1535. <https://doi.org/10.1002/POL.1974.180120801>
- Biedermann, M., Biedermann-Brem, S., & Grob, K. (2017). May polypropylene films be a sufficiently effective functional barrier for foods packed in recycled paperboard and stored at room temperature? *Journal of Consumer Protection and Food Safety* 2017 12:2, 12(2), 171–174. <https://doi.org/10.1007/S00003-017-1101-5>
- Billmeyer, F. W. (1975). *Ciencia de los polímeros* (R. Areal & G. Martín (eds.); 2nd ed.). Reverté. S.A. <http://books.google.com/books?id=vL9QrpOKsQcC&pgis=1>
- Björklund, A., & Finnveden, G. (2005). Recycling revisited—life cycle comparisons of global warming impact and total energy use of waste management strategies. *Resources, Conservation and Recycling*, 44(4), 309–317. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2004.12.002>
- CHEN, J. X., ZHONG, Z. X., SU, Z. H., LI, Z. P., WENG, Z. F., & LUO, S. Y. (2020). Analysis of Defects in Biaxially Oriented Polypropylene Films by Micro-Fourier Transform Infrared and Raman Spectroscopies. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 48(10), e20134–e20138. [https://doi.org/10.1016/S1872-2040\(20\)60055-X](https://doi.org/10.1016/S1872-2040(20)60055-X)
- Dassault Systemes. (2021). *SOLIDWORKS*. <https://www.solidworks.com/es>
- Granda, M., & Mediavilla, E. (2015). *Instrumentación electrónica: transductores y acondicionadores de señal*. Editorial de La Universidad de Cantabria. <https://elibro.net/es/lc/itcr/titulos/53391>
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Hawk, R. J. A., Wilson, R. D., Danks, D. R., & Kiser, M. T. (2021). Abrasive Wear Failures. *Failure*

- Analysis and Prevention*, 11, 649–664. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v11.a0006790>
- HuffPost. (2020, December 30). *130 años de calentamiento global en siete segundos*. [https://www.huffingtonpost.es/entry/demolador-130-anos-de-calentamiento-global-en-siete-segundos\\_es\\_5fec3ad1c5b6e1ce833d6](https://www.huffingtonpost.es/entry/demolador-130-anos-de-calentamiento-global-en-siete-segundos_es_5fec3ad1c5b6e1ce833d6)
- Japan Meteorological Agency. (2021, May 19). *Global Average Surface Temperature Anomalies*. [https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/gwp/temp/list/year\\_wld.html](https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/gwp/temp/list/year_wld.html)
- Kam, P. M., Aznar-Siguan, G., Schewe, J., Milano, L., Ginnetti, J., Willner, S., McCaughey, J. W., & Bresch, D. N. (2021). Global warming and population change both heighten future risk of human displacement due to river floods. *Environmental Research Letters*, 16(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABD26C>
- Li, Z., Sun, Y., Li, T., Chen, W., & Ding, Y. (2021). Projections of south Asian summer monsoon under global warming from 1.5° to 5°C. *Journal of Climate*, 34(19), 7913–7926. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0547.1>
- Lieberman, B. (2021, August 4). *1.5 or 2 degrees Celsius of additional global warming: Does it make a difference?* YALE Climate Connections; Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AAB827>
- Minitab. (2020). *Revisión general de Gráfica de CDF empírica*. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/graphs/empirical-cdf-plot/before-you-start/overview/>
- Mo, C., Yuan, W., Lei, W., & Shijiu, Y. (2014). Effects of temperature and humidity on the barrier properties of biaxially-oriented polypropylene and polyvinyl alcohol films. *Journal of Applied Packaging Research*. <http://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=japr>
- MTS. (2017). *MTS Bionix® Tabletop Test Systems Flexible*. MTS. [https://corp.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev\\_003992.pdf](https://corp.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev_003992.pdf)
- Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. [https://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agreement\\_spanish\\_.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf)
- Oben Group. (n.d.). *Opp SealFilm*.
- Plastics Europe. (2020). *Plastics - the Facts 2020*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>
- Rajadell Carreras, M., & Sánchez García, J. L. (2010). *Lean Manufacturing, la evidencia de una necesidad*. <https://elibro.net/es/lc/itcr/titulos/53016>
- Ram, S., & Mandal, T. K. (2004). Photoluminescence in small isotactic, atactic and syndiotactic PVA polymer molecules in water. *Chemical Physics*, 303(1–2), 121–128. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMPHYS.2004.05.006>
- Ramos, M. (2015). *Diseño del sistema de control interno en la empresa AB OPTICAL de la ciudad de Loja* [Loja 14 de abril]. <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/10494>
- Rodriguez, F., Cohen, C., Ober, C. K., & Archer, L. (2014). Principles of Polymer Systems. *Principles of Polymer Systems*. <https://doi.org/10.1201/B17873>
- Rohit, K., & Dixit, S. (2017). Tensile and Impact Behaviour of Thermoplastic BOPP/Milk Pouches Blends Reinforced with Sisal Fibers. <https://doi.org/10.1177/147776061703300302>, 33(3), 139–152. <https://doi.org/10.1177/147776061703300302>
- Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C., & Pounds, J. A. (2003).

- Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 2003 421:6918, 421(6918), 57–60. <https://doi.org/10.1038/nature01333>
- Shen, M., Huang, W., Chen, M., Song, B., Zeng, G., & Zhang, Y. (2020). (Micro)plastic crisis: Unignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120138. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120138>
- Shigley, J. E., Nisbett, J. K., & Budynas, R. G. (2019). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (10th ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Tekscan. (2021). *Large Force Sensing Resistor | FlexiForce A401 Sensor | Tekscan*. <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a401>
- Wang, C., Lin, C. C., & Tseng, L. C. (2006). Miscibility, crystallization and morphologies of syndiotactic polystyrene blends with isotactic polystyrene and with atactic polystyrene. *Polymer*, 47(1), 390–402. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2005.10.123>
- Yuksekkalayci, C., Yilmazer, U., & Orbey, N. (1999). Effects of nucleating agent and processing conditions on the mechanical, thermal, and optical properties of biaxially oriented polypropylene films. *Polymer Engineering & Science*, 39(7), 1216–1222. <https://doi.org/10.1002/PEN.11508>
- Zhang, M., Lian, X., Cui, J., Li, X., & Wang, H. (2021). Synthesis of waterborne polyurethane ink binder with high T-peel strength and its application in biaxially oriented polypropylene film printing. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(17). <https://doi.org/10.1002/APP.50273>

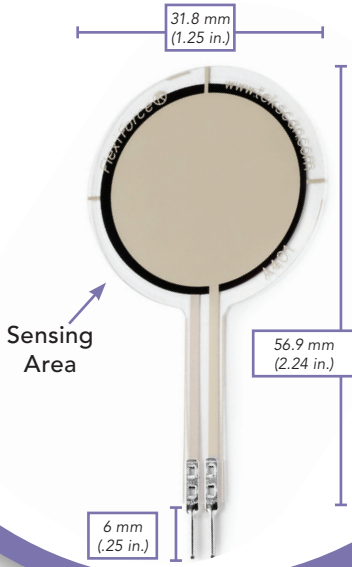


## Actualización al Cronograma de Trabajo

Actividad		CRONOGRAMA																
		Semana																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
OE 1	1. Delimitar como se analizará la correcta colocación y montaje de las mordazas y realizar las diferentes configuraciones.	X	X	X	X													
OE 1	2. Analizar el estado de los cortes y sellos realizados por las mordazas de la máquina <i>WM18 SynchroFlo</i> de acuerdo con el tipo de configuración.				X	X												
OE 2	1. Establecer los parámetros correctos de acuerdo con el tipo de plástico y resultados obtenidos al usar la máquina <i>WM18 SynchroFlo</i> .					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
OE 3	2. Aplicar los parámetros establecidos con la máquina en funcionamiento, sin el uso de galletas dentro del empaque.													X	X			
OE 4	1. Establecer un lote o tiempo de producción para estudiar y evaluar.													X				
OE 4	2. Realizar un control de calidad sobre las características de los sellos del lote establecido.										X	X	X	X	X	X	X	X
OE 5	1. Observar y determinar las acciones que propician el desgaste prematuro de los componentes.										X		X		X	X	X	
OE 5	2. Realizar revisiones periódicas de control de calidad para observar el progreso de los componentes en su desgaste.										X		X		X	X	X	
OE 6	1. Determinar las virtudes, desventajas y mejoras del plan de acción hasta este punto.												X	X	X	X	X	
OE 6	2. Plantear el procedimiento para las otras líneas de producción de acuerdo con el tipo de empaque empleado y las propiedades de la máquina.												X	X	X	X	X	
Divulgación																		X
Informes					X								X					X

## Anexos

### Actual size of sensor



# FlexiForce™ Standard Model A401

The FlexiForce A401 is our standard piezoresistive force sensor with the largest sensing area. It is available off-the-shelf for easy proof of concept and is also available in large volumes for design-in applications. The A401 can be used with our test & measurement, prototyping, and embedding electronics, including the FlexiForce Sensor Characterization Kit, FlexiForce Prototyping Kit, FlexiForce Quickstart Board, and the ELF™ System\*. You can also use your own electronics, or multimeter.

## Physical Properties

Thickness	0.203 mm (0.008 in.)
Length	56.9 mm (2.24 in.)**
Width	31.8 mm (1.25 in.)
Sensing Area	25.4 mm (1 in.) diameter
Connector	2-pin Male Square Pin
Substrate	Polyester
Pin Spacing	2.54 mm (0.1 in.)

## Benefits

- Thin and flexible
- Easy to use
- Convenient and affordable

**✓ ROHS COMPLIANT**

\* Sensor will require an adapter/extender to connect to the ELF System. Contact your Tekscan representative for assistance.

\*\*Length does not include pins. Please add approximately 6 mm (0.25 in.) for pin length for a total length of approximately 32 mm (1.25 in.).

	Typical Performance	Evaluation Conditions
Linearity (Error)	< ±3% of full scale	Line drawn from 0 to 50% load
Repeatability	< ±2.5%	Conditioned sensor, 80% of full force applied
Hysteresis	< 4.5% of full scale	Conditioned sensor, 80% of full force applied
Drift	< 5% per logarithmic time scale	Constant load of 111 N (25 lb)
Response Time	< 5µsec	Impact load, output recorded on oscilloscope
Operating Temperature	-40°C - 60°C (-40°F - 140°F)	Convection and conduction heat sources
Durability	≥ 3 million actuations	Perpendicular load, room temperature, 22 N (5 lb)
Temperature Sensitivity	0.36%/°C (± 0.2%/°F)	Conductive heating

\*\*\*

\*\*\*All data above was collected utilizing an Op Amp Circuit (shown on the next page). If your application cannot allow an Op Amp Circuit, visit [www.tekscan.com/flexiforce-integration-guides](http://www.tekscan.com/flexiforce-integration-guides), or contact a FlexiForce Applications Engineer.

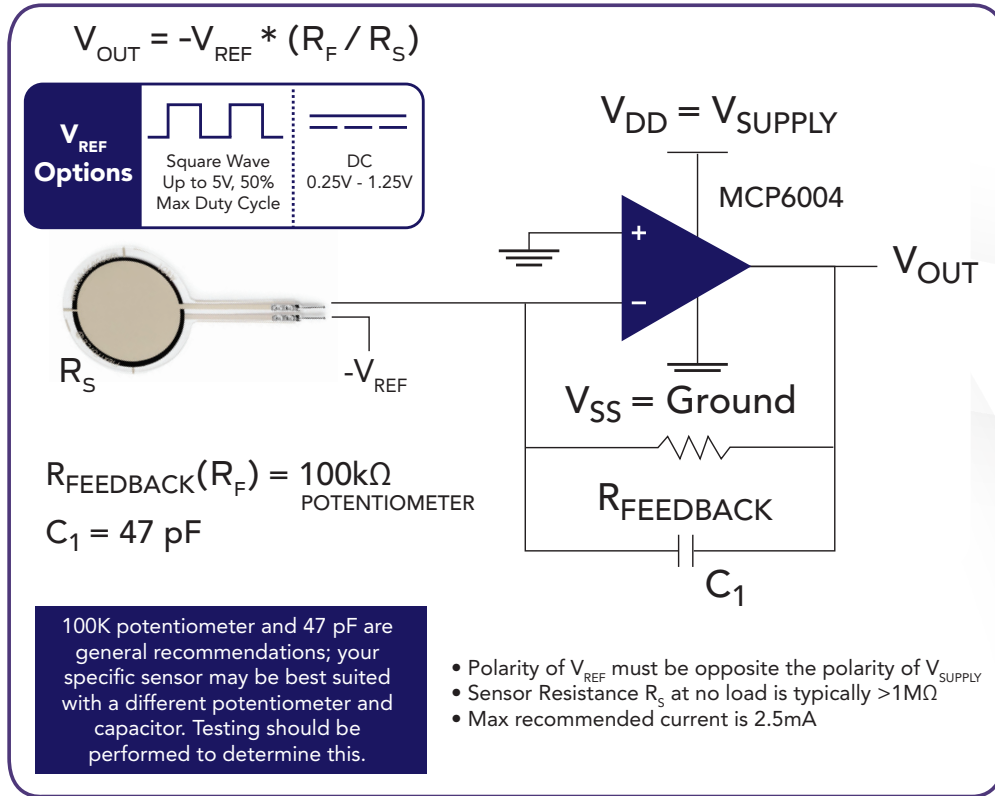
**Standard Force Ranges as Tested with Circuit Shown**

111 N (0 - 25 lb) †

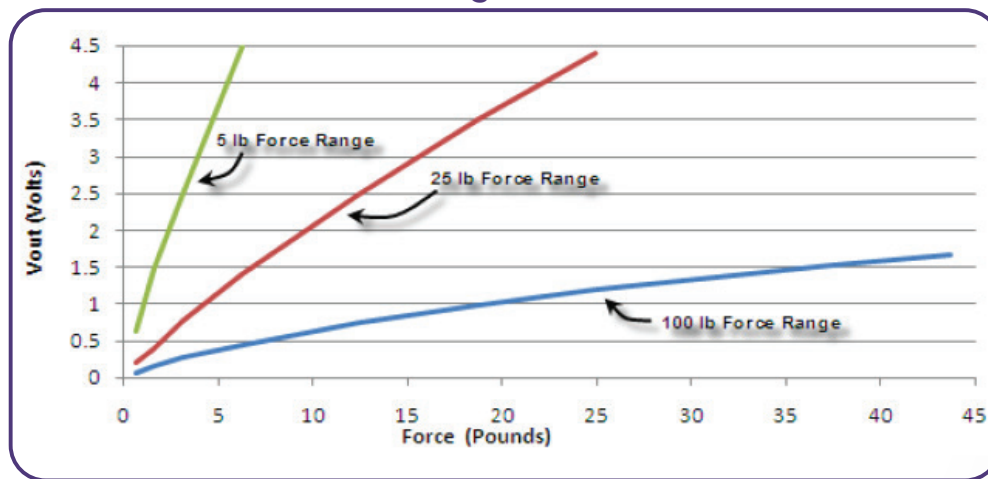
† This sensor can measure up to 31,138 N (7,000 lb). The force range can be extended by reducing the drive voltage,  $V_T$ , or the resistance value of the feedback resistor,  $R_F$ . Conversely, the sensitivity can be increased for measurement of lower forces by increasing  $V_T$  or  $R_F$ .

Sensor output is a function of many variables, including interface materials. Therefore, Tekscan recommends the user calibrate each sensor for the application. The graph below-right is an illustration of how a sensor can be used to measure varying force ranges by changing the feedback resistor (Figure 1 below should not be used as a calibration chart).

**Recommended Circuit**



**Figure 1**



**PURCHASE TODAY ONLINE AT [WWW.TEKSCAN.COM/STORE](http://WWW.TEKSCAN.COM/STORE)**





Designation: F88/F88M – 15

# Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation F88/F88M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

## 1. Scope

1.1 This test method covers the measurement of the strength of seals in flexible barrier materials.

1.2 The test may be conducted on seals between a flexible material and a rigid material.

1.3 Seals tested in accordance with this test method may be from any source, laboratory or commercial.

1.4 This test method measures the force required to separate a test strip of material containing the seal. It also identifies the mode of specimen failure.

1.5 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

## 2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*<sup>2</sup>

D882 Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting

E171 Practice for Conditioning and Testing Flexible Barrier Packaging

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

## 3. Terminology

### 3.1 Definitions:

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee F02 on Flexible Barrier Packaging and is the direct responsibility of Subcommittee F02.20 on Physical Properties.

Current edition approved Nov. 1, 2015. Published December 2015. Originally approved in 1968. Last previous edition approved in 2009 as F88/F88M – 09. DOI: 10.1520/F0088\_F0088M-15.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

3.1.1 *average seal strength, n*—average force per unit width of seal required to separate progressively a flexible material from a rigid material or another flexible material, under the conditions of the test.

3.1.1.1 *Discussion*—The average force normally is calculated by the testing machine from the digitized plot of force versus grip travel. The plot starts from zero force after slack has been removed from the test strip. The initial ramp-up from zero to the force level required to peel the seal is not indicative of seal strength, and data from that part of the curve should not be included in the calculation of average strength, nor should the return to zero following complete failure of the specimen. The amount of data actually discarded on each end of the measured seal-profile curve must be the same for all tests within any set of comparisons of average seal strength (see 6.1.1 and 9.8.1).

3.1.2 *flexible, adj*—indicates a material with flexural strength and thickness permitting a turn back at an approximate 180 degree angle.

3.1.3 *maximum seal strength, n*—maximum force per unit width of seal required to separate progressively a flexible material from a rigid material or another flexible material, under the conditions of the test.

## 4. Significance and Use

4.1 Seal strength is a quantitative measure for use in process validation, process control, and capability. Seal strength is not only relevant to opening force and package integrity, but to measuring the packaging processes' ability to produce consistent seals. Seal strength at some minimum level is a necessary package requirement, and at times it is desirable to limit the strength of the seal to facilitate opening.

4.1.1 The maximum seal force is important information, but for some applications, average force to open the seal may be useful, and in those cases also should be reported.

4.2 A portion of the force measured when testing materials may be a bending component and not seal strength alone. A number of fixtures and techniques have been devised to hold samples at various angles to the pull direction to control this bending force. Because the effect of each of these on test results is varied, consistent use of one technique (Technique A,

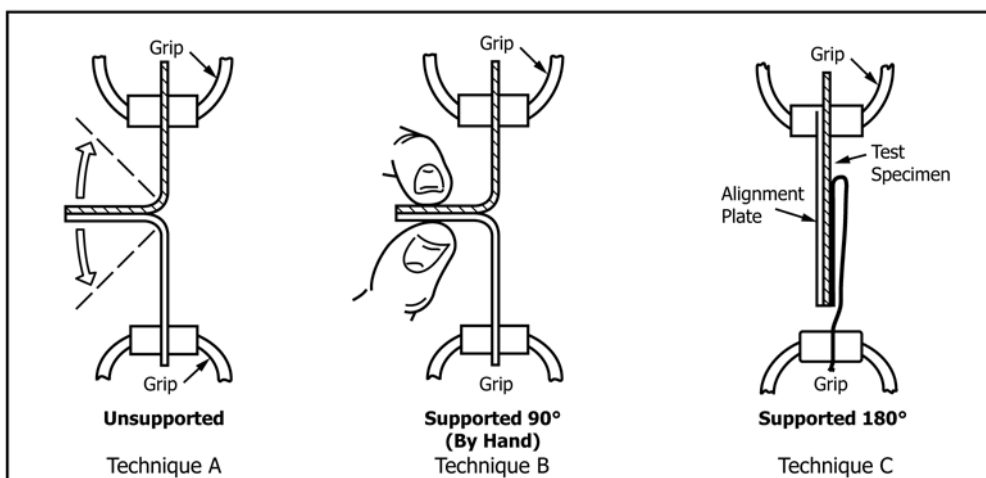


FIG. 1 Tail Holding Methods

Technique B, or Technique C) throughout a test series is recommended. Examples of fixtures and techniques are illustrated in Fig. 1.

4.2.1 *Technique A: Unsupported*—Each tail of the specimen is secured in opposing grips and the seal remains unsupported while the test is being conducted.

4.2.2 *Technique B: Supported 90° (By Hand)*—Each tail of the specimen is secured in opposing grips and the seal remains hand-supported at a 90° perpendicular angle to the tails while the test is being conducted.

4.2.3 *Technique C: Supported 180°*—The least flexible tail is supported flat against a rigid alignment plate held in one grip. The more flexible tail is folded 180° over the seal and is held in the opposing grip while the test is being conducted.

## 5. Interferences

5.1 The value obtained for seal strength can be affected by properties of the specimen other than seal strength. These interferences are discussed in the annex.

## 6. Apparatus

6.1 *Tensile Testing Machine*—A testing machine of the constant rate-of-jaw-separation type. The machine shall be equipped with a weighing system that moves a maximum distance of 2 % of the specimen extension within the range being measured. The machine shall be equipped with a device for recording the tensile load and the amount of separation of the grips; both of these measuring systems shall be accurate to  $\pm 2$  %. The rate of separation of the jaws shall be uniform and capable of adjustment from approximately 8 to 12 in. [200 to 300 mm]/min. The gripping system shall be capable of minimizing specimen slippage and applying an even stress distribution to the specimen.

6.1.1 If calculation of average seal strength is required, the testing machine system shall have the capability to calculate its value over a specified range of grip travel programmable by the operator. Preferably, the machine shall have the capability also to plot the curve of force versus grip travel.

6.2 *Specimen Cutter*, conforming to the requirements of 5.4 of Test Methods D882, sized to cut specimens to a width of 0.984 in. [25 mm], 0.591 in. [15 mm], or 1.00 in. [25.4 mm]. Tolerance shall be  $\pm 0.5$  %.

## 7. Sampling

7.1 The number of test specimens shall be chosen to permit an adequate determination of representative performance.

7.2 Testing of samples with visual defects or other deviations from normality may or may not be appropriate depending on the purpose of the investigation. Indiscriminate elimination of defects can bias results.

## 8. Aging and Conditioning

8.1 In the absence of information showing that heat seal strength stability of the materials under test is reached in shorter times, condition and test sealed materials in accordance with Specification E171, with a minimum conditioning time of 40 h or longer if shown to be required to reach stability.

8.2 Heat seal conditioning periods may be shortened to times determined by experimentation as sufficient to achieve seal strength stability.

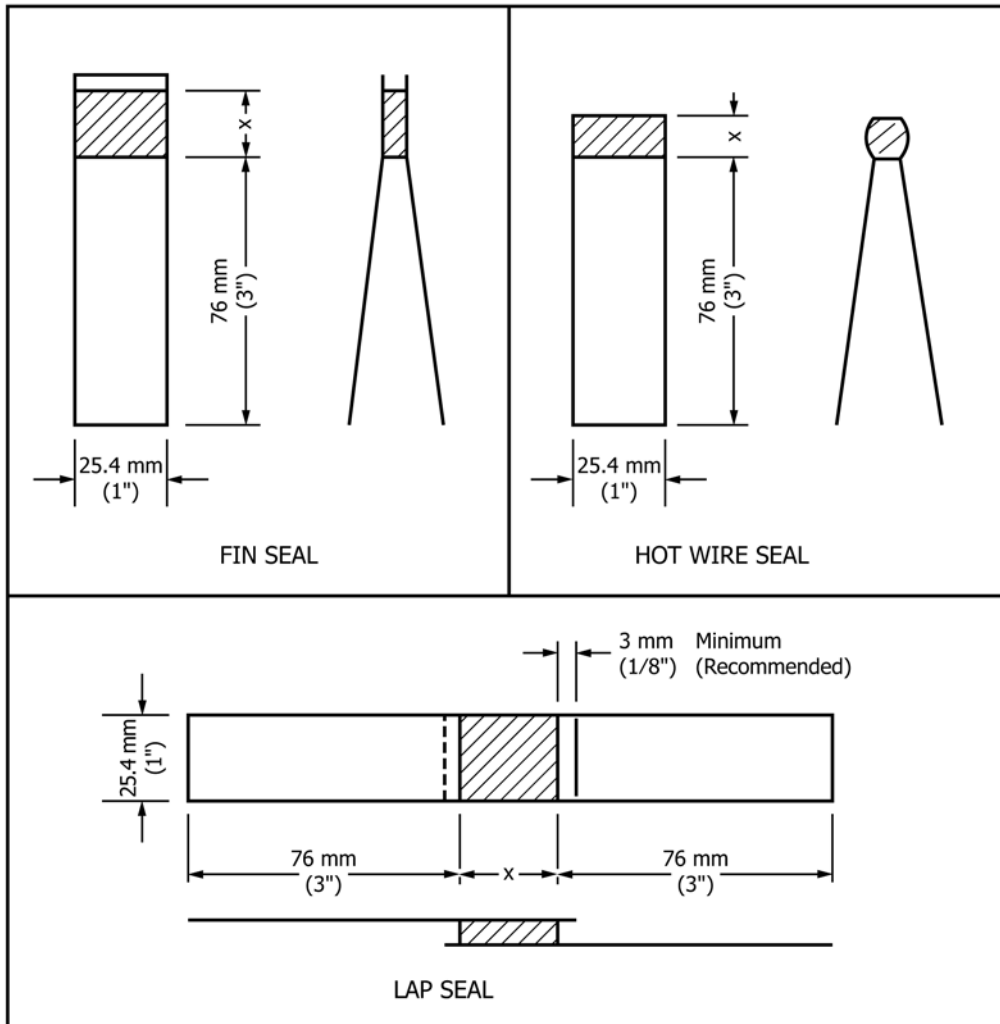
8.3 Modification of conditioning practices may be necessary to meet specific test objectives, such as the measurement of seal strength at specified storage or handling temperature.

## 9. Procedure

9.1 Calibrate the tensile machine in accordance with the manufacturer's recommendations.

9.2 Prepare sealed test specimens for testing by cutting to the dimensions shown in Fig. 2. Edges shall be clean-cut and perpendicular to the direction of seal. Specimen legs may be shorter than shown, depending on the grip dimensions of the testing machine.

9.3 Adhering to one tail-holding technique, clamp each leg of the test specimen in the tensile testing machine. The sealed



NOTE 1—Seal dimension marked X varies with sealer configuration.

FIG. 2 Recommended Specimen Dimensions

area of the specimen shall be approximately equidistant between the grips. Recommended distance between grips (initial unconstrained specimen length) is:

Fin and Hot-Wire Seals		
Highly <sup>A</sup> extensible materials	0.39 in.	[10 mm]
Less <sup>A</sup> extensible materials	1.0 in.	[25 mm]
Lap Seals	X + 10 mm <sup>B</sup>	

<sup>A</sup> Grip separation distance is recommended to be limited for highly extensible materials (100 + % elongation at seal failure) to minimize interferences (see annex).

<sup>B</sup> Refer to Fig. 2 for definition of X.

9.4 Center the specimen laterally in the grips. Align the specimen in the grips so the seal line is perpendicular to the direction of pull, allowing sufficient slack so the seal is not stressed prior to initiation of the test.

9.5 A significant difference in measured seal strength has been shown to result, depending on the orientation of a fin-seal tail during the test. The test report should indicate the details of any technique used to control tail orientation.

9.6 The seal shall be tested at a rate of grip separation of 8 to 12 in./min [200 to 300 mm/min].

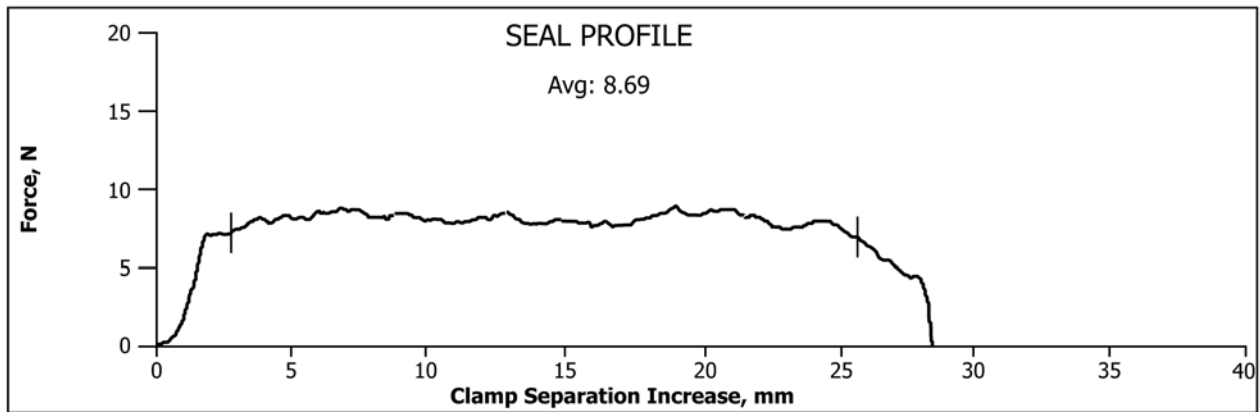
9.7 For each cycle, report the maximum force encountered as the specimen is stressed to failure and identify the mode of specimen failure.

9.8 If the test strip peels apart in the seal area, either by adhesive failure, cohesive failure, or delamination, the average peel force may be an important index of performance and should be measured by the testing machine as a part of the test cycle.

9.8.1 Follow the machine manufacturer's instructions to select the desired algorithm for calculating average seal strength. Fig. 3 illustrates the effect of an algorithm that uses data only from the central 80 % of the curve to calculate the average.

9.8.2 If the test strip does not peel significantly in the seal area and failure is largely by breaking, tearing, or elongation of the substrate material, average force to failure may have little





MARKERS ON SEAL PROFILE PLOT AT 10% AND 90% ESTABLISH DATA WINDOW OF 80% FOR CALCULATION

FIG. 3 Calculation of Average Seal Strength

significance in describing seal performance and should not be reported in such cases (see Annex A1.1).

9.9 A plot of force versus grip travel may be useful as an aid in interpretation of results. In those cases, the testing machine should be programmed to generate the plot.

9.10 Other properties, such as energy to cause seal separation, may be appropriate in cases where grip travel results only in peel. When other failure modes (elongation, break, tear, delamination (when not a designed peel seal separation mode) or other) are present in addition to peel of the seal, energy, and other functions must be interpreted with caution.

10. Report

10.1 Report the following:

- 10.1.1 Complete identification of material being tested.
- 10.1.2 Equipment and test method or practice used to form seals, if known.
- 10.1.3 Equipment used to test seals.

TABLE 1 Materials and Techniques

Test Series "A" (MAXIMUM Values)
Heat Seal Coated 50# Basis Weight Paper sealed to Film (48 ga. PET/2 mil LDPE) Supported 90° @ 12 in./min Unsupported @ 12 in./min Unsupported @ 8 in./min
Test Series "B" (Both MAXIMUM Values and AVERAGE Peel Values were reported)
Uncoated 1073B Tyvek sealed to Film (48 ga. PET/2 mil LDPE) Supported 90° @ 12 in./min Unsupported @ 12 in./min Supported 180° @ 12 in./min Reverse direction of materials in grips @ 12 in./min
Test Series "C" (MAXIMUM Values)
Coex HDPE 3 mil film with peelable sealant layer sealed face-to-face Foil Composite 5 mil with same peelable sealant surface sealed face-to-face Unsupported @ 12 in./min Supported 180° @ 12 in./min

TABLE 2 Test Equipment

Manufacturer	Models	Load Cell	
		lb	N
Dillon	AFG-50N	11.2	50
Instron	4464, 5500R, 5564,	1124, 112.4,	5 kN, 500,
	5565, S5R1123, 4442, MN-44	22.5, 11.2, 2	100, 50, 9
Lloyd Instruments	1300-36	22.4	100
MTS Sintech Renew	4204	25	111.2
Test Resources	2000ZR	25	111.2
Thwing Albert	EJA	11.2	50
Vinatoru Enterprises	CCT, HST	11.2	50

10.1.4 Ambient conditions during tests; temperature and humidity.

10.1.5 Grip separation rate.

10.1.6 Initial grip separation distance.

10.1.7 Seal width.

10.1.8 Machine direction of material in relation to direction of pull may be noted, if known and relevant to the test outcome.

10.1.9 Force (strength) values to three significant figures.

10.1.10 Technique of holding the tail (Technique A, B, or C) and any special fixtures used to hold specimens.

10.1.11 If the seal is made between two different materials, record which material is clamped in each grip.

10.1.12 Number of specimens tested and method of sampling.

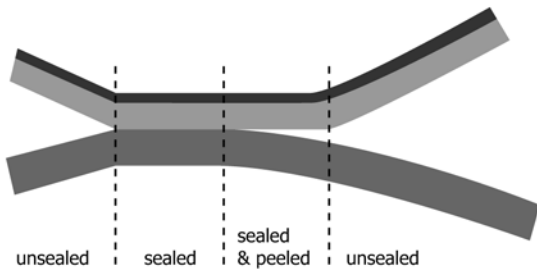
10.1.13 Any other pertinent information that may affect test results.

10.1.14 Visual determination of mode of specimen failure. Frequently more than one mode will occur in the course of failure of an individual strip. Record all modes observed. A suggested classification of modes is (see Fig. 4):

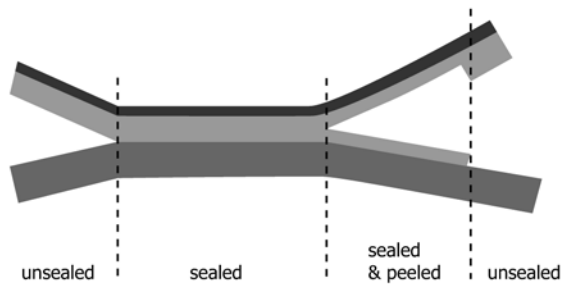
- Adhesive failure of the seal; peel.
- Cohesive failure of the material.
- Break or tear of material in seal area or at seal edge.
- Delamination of surface layer(s) from substrate.
- Elongation of material.
- Break or tear of material remote from seal.



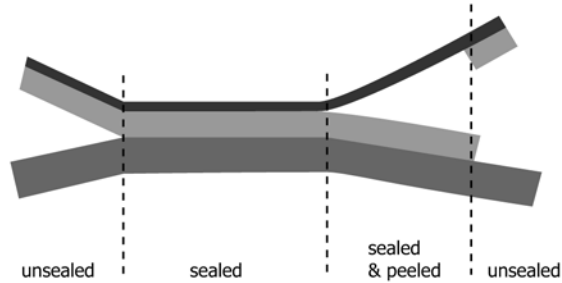
SEAL SEPARATION MODES



ADHESIVE PEEL



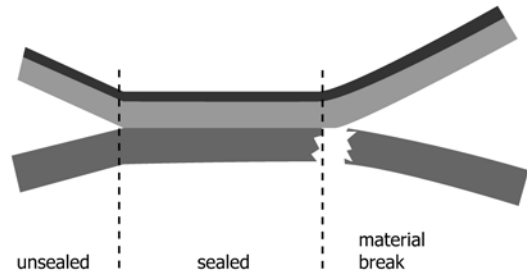
COHESIVE PEEL



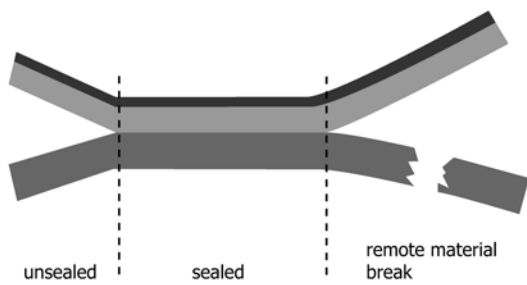
DELAMINATION

INTERFERENCES

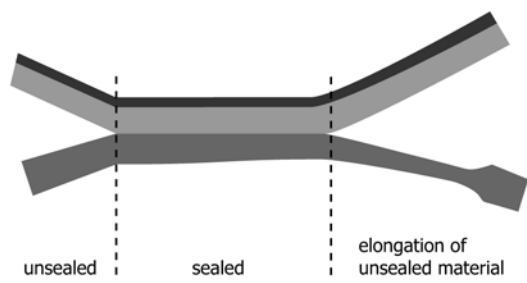
Though the diagrams show only one web being affected, it is possible for either or both webs to partially or fully exhibit interferences. Delamination, when not a designed seal separation mode, is an interference.



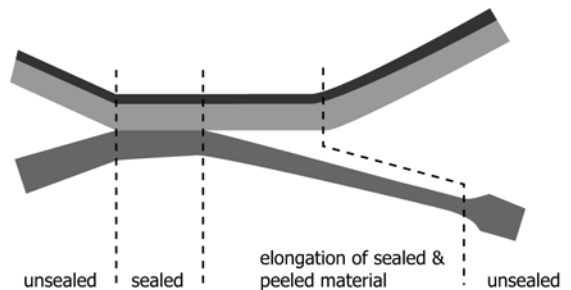
MATERIAL BREAK



MATERIAL BREAK (REMOTE)



MATERIAL ELONGATION



PEEL WITH ELONGATION

NOTE 1—Schematic representation of seal failure modes for seals between two webs. No diagram is included for systems including an adhesive as a third component.

FIG. 4 Test Strip Failure Modes

10.1.15 Maximum force encountered as each specimen is stressed to failure, expressed preferably in Newtons/meter or lbf/in. of original specimen width. Gmf/in. and lbf/in. are commonly used.

10.1.16 *Average Peel Force*, if applicable (see 9.8)—If this measurement is reported, a statement of the method or algorithm used to calculate the average should be included.

10.1.17 Plot of force versus grip travel, if deemed significant in interpretation of results.

10.1.18 Other data not compromised by interferences, if such data are relevant to the specific test purpose.

10.1.19 Any statistical calculation deemed appropriate (most commonly mean, range, and standard deviation).

## 11. Precision and Bias

11.1 *Precision*—A round robin was conducted using Practice E691 as a guide, involving 18 laboratories measuring a total of 1980 samples distributed over three different test groups of six laboratories each.<sup>3</sup> In order to maintain a focus on testing the method itself, laboratory samples were used to limit the amount of variation in the seals produced. Description of materials measured and methods used are listed in Table 1. Seven different brands of tensile testing equipment were used to collect information. The model identifications and load cell sizes are listed in Table 2. Statistical summaries of repeatability

<sup>3</sup> Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:F02-1023.

(within a laboratory) and reproducibility (between laboratories) are listed in Table 4 for SI units and Table 3 in units of pounds per inch. Fig. 5 is graphical depictions of data.

11.2 *Concept of “r” and “R” in Tables 4 and 3*— If  $S_r$  and  $S_R$  have been calculated from a large enough body of data, and for test results that are averages from testing 10 to 30 specimens (see Note 1) for each test result, then the following applies:

NOTE 1—Repeatability and reproducibility comparisons for smaller sample size (n=10) can be found in the Appendix section of this test method.

11.2.1 Repeatability “r” is the interval representing the critical difference between test results for the same material and method, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory. Test results shall be deemed to be not equivalent if they differ by more than the “r” value for that material or method.

11.2.2 Reproducibility “R” is the interval representing the critical difference between test results for the same material and method, obtained by different operators using the different equipment in different laboratories, not necessarily on the same day. Test results shall be deemed to be not equivalent if they differ by more than the “R” value for that material or method.

11.3 Any judgment in accordance with 11.2.1 or 11.2.2 will have approximately 95 % (0.95) probability of being correct.

11.4 *Bias*—There are no recognized standards by which to estimate the bias of this test method.

**TABLE 3 r and R Summary (Inch-Pound Units)**

NOTE 1—In accordance with Practice E691, enter the larger of the values obtained by the use of (equation for  $S_r$ ) and (equation for  $S_R$ ) as the final value of  $S_R$  to be used for precision statements.

Units: lb/in.	$S_r$	$S_R$	r	R	Grand Avg
A Supported 90°	0.0396	0.0473	0.1109	0.1324	0.957
A Unsupported at 12 in./min	0.0929	0.1286	0.2601	0.3602	1.424
A Unsupported at 8 in./min	0.1063	0.1488	0.2977	0.4166	1.417
B PEAK 90°	0.2629	0.2539	0.7361	0.7361 <sup>A</sup>	0.923
B AVG 90°	0.1600	0.1599	0.4480	0.4480	0.684
B PEAK Unsupported	0.2683	0.2630	0.7513	0.7513 <sup>A</sup>	1.709
B AVG Unsupported	0.2510	0.2492	0.7029	0.7029 <sup>A</sup>	1.453
B PEAK 180°	0.2977	0.3292	0.8335	0.9218	3.239
B AVG 180°	0.3070	0.3567	0.8596	0.9988	2.990
B PEAK 180° Reverse	0.5536	0.5971	1.5501	1.6720	1.464
B AVG 180° Reverse	0.2560	0.2451	0.7167	0.7167 <sup>A</sup>	0.936
C 3 mil Film Unsupported	0.0605	0.1059	0.1695	0.2966	1.695
C 3 mil Film 180°	0.1786	0.3003	0.5001	0.8408	3.463
C 5 mil Foil Unsupported	0.0382	0.0272	0.1069	0.2051	1.209
C 5 mil Foil 180°	0.3164	0.3476	0.8859	0.9731	4.569

<sup>A</sup> Per Practice E691: “Enter the larger of the values obtained by the use of (equation for  $s_r$ ) and (equation for  $s_R$ ) as the final value of  $s_R$  to be used for precision statements.”

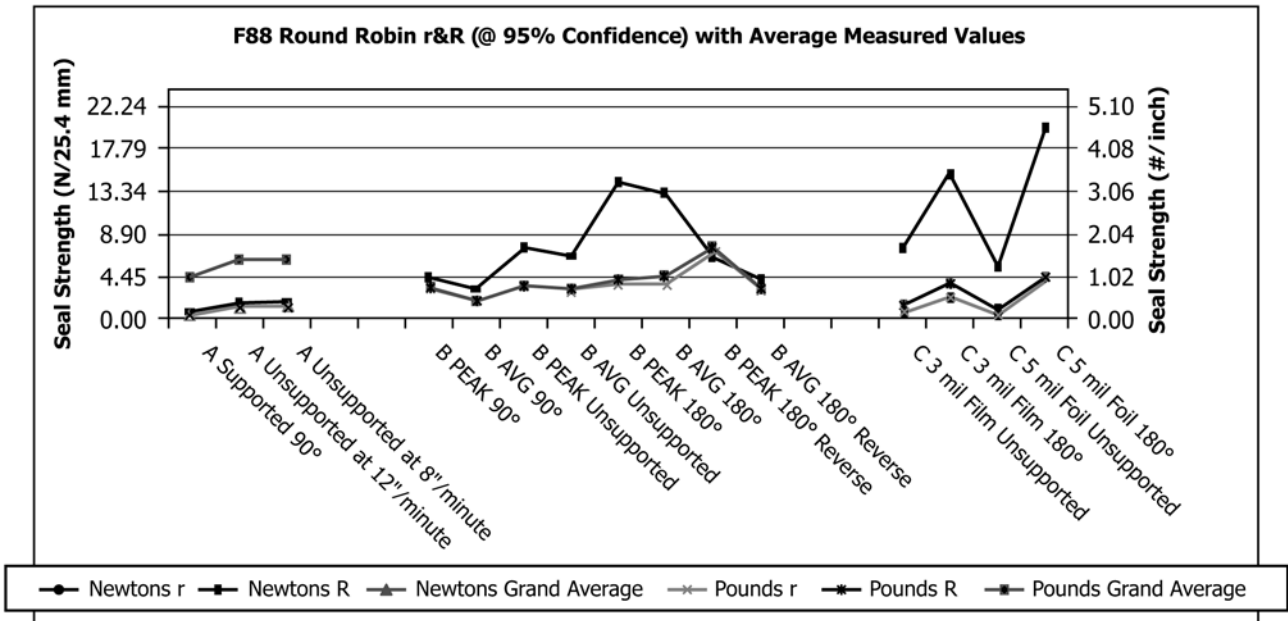
**TABLE 4 r and R Summary (SI Units)**

NOTE 1—In accordance with Practice E691, enter the larger of the values obtained by the use of (equation for  $S_r$ ) and (equation for  $S_R$ ) as the final value of  $S_R$  to be used for precision statements.

NOTE 2—The values stated were converted from inch-pound units.

Units: N/25.4 mm	$S_r$	$S_R$	r	R	Grand Avg
A Supported 90°	0.1761	0.2103	0.4932	0.5889	4.2569
A Unsupported at 12 in./min	0.4132	0.5722	1.1568	1.6021	6.3343
A Unsupported at 8 in./min	0.4729	0.6618	1.3242	1.8529	6.3031
B PEAK 90°	1.1694	1.1293	3.2742	3.2742 <sup>A</sup>	4.1057
B AVG 90°	0.7117	0.7112	1.9927	1.9927	3.0426
B PEAK Unsupported	1.1936	1.1700	3.3421	3.3421 <sup>A</sup>	7.6020
B AVG Unsupported	1.1167	1.1084	3.1267	3.1267 <sup>A</sup>	6.4633
B PEAK 180°	1.3242	1.4643	3.7077	4.1002	14.4078
B AVG 180°	1.3656	1.5868	3.8236	4.4431	13.3002
B PEAK 180° Reverse	2.4625	2.6562	6.8950	7.4373	6.5122
B AVG 180° Reverse	1.1386	1.0901	3.1880	3.1880 <sup>A</sup>	4.1635
C 3 mil Film Unsupported	0.2693	0.4712	0.7539	1.3194	7.5397
C 3 mil Film 180°	0.7945	1.3357	2.2245	3.7400	15.4042
C 5 mil Foil Unsupported	0.1699	0.3203	0.4757	0.8968	5.3779
C 5 mil Foil 180°	1.4074	1.5460	3.9406	4.3287	20.3239

<sup>A</sup> Per Practice E691: "Enter the larger of the values obtained by the use of (equation for  $s_r$ ) and (equation for  $s_R$ ) as the final value of  $s_R$  to be used for precision statements."



**FIG. 5 F88 Round Robin r & R (at 95 % confidence) With Average Measured Values**

**ANNEX**
**(Mandatory Information)**
**A1. INTERFERENCES**

**A1.1 Failure Mode**—The objective of this test method is to measure the strength of seals in flexible barrier materials. The intent is to determine seal strength by measuring force required to peel a seal apart while pulling on the ends of a strip of material containing the seal. However, the pulling process may or may not result in the desired mode of strip failure. During the test cycle, the grips are moved apart at a set rate while the force required to extend the ends of the strip is continuously monitored. Extension of the specimen ends can cause one or a combination of the following effects within the specimen itself:

Break or tear of material at edge of seal.  
 Elongation of the material.  
 Break or tear of material remote from seal.

**A1.1.1** These effects are due to failure of the material itself and must be identified as such in the test report. These effects are typical for weld seal applications. However, for peelable applications, these effects are interferences that can prevent the method from measuring the true strength of the seal.

**A1.1.2** Seal characteristics such as deformation, shrinkage, and burnthrough can affect the outcome of the test.

**A1.2 Effect of Material Elongation on Rate of Peel**—Another interference is caused by elongation of the material during the test. If the test strip stretches or delaminates during

grip travel, the rate of peel will be lower than that calculated from the grip separation rate. In this instance, the ratio of stretch to peel is unknown and may vary during the test. The rate of peel is then no longer controlled by the machine. Rate of peel is known to affect measured seal strength value.

**A1.3 Initial Clamp Separation Distance**—Since the material between the seal and the grips can interfere significantly with measurement of seal strength, in accordance with the preceding paragraphs, the initial clamp separation distance should be set at a relatively low value to minimize that potential.

**A1.4 Peel Rate versus Grip Separation Rate**—In peel testing, whenever separation of the grips holding the test strip is translated completely into peeling of the seal, an increase in grip separation of X cm causes an advance of the failure line into the seal of 0.5X cm. The peel rate in this ideal situation is therefore ½ of the grip separation rate. This arithmetic is commonly overlooked, leading to peel rate being incorrectly equated with grip separation rate.

**APPENDIX**
**(Nonmandatory Information)**
**X1. ILS BACKGROUND, RATIONALE, AND ANALYSIS**

**X1.1** The Interlaboratory Study (ILS) performed in 2004 to create the data for the statement found in Section 11 Precision and Bias was collected from 18 labs.<sup>3</sup> The ASTM F02.3 and F02.6 subcommittees in joint participation ran nearly 2000 samples through tensile test devices that fulfilled the requirements of the apparatus section of this test method. Since the method and the techniques discussed in the standard were the focus of the study the joint subcommittee concluded that the samples should be as close to homogeneous as possible, that is, not production machine samples but controlled laboratory made samples. Therefore they were created using materials from one single lot each, then sealed on a single laboratory sealing machine from each of the three companies volunteering for sample preparation and trimmed to the defined cut size prior to shipping out to the test laboratories and their assigned contacts.

**X1.1.1** Three protocols were designed, each using a different material combination. The materials used included a heat seal coated paper material sealed to a film (PET/LDPE), an uncoated Tyvek 1073B material sealed to a film (PET/LDPE)

and a set of material composites (3 mil Film/Film and 5 mil foil/foil) with a peelable sealant surface sealed face-to-face. Each series was designed to identify the effects of variations in the use of the method on the final measured result as well as on repeatability (r) and reproducibility (R). These techniques are listed in **Table X1.1**.

**X1.1.2** The ILS studies were essentially separate and data was not compared from group to group unless changes in technique resulted in common effects to measured values or to r & R. At that point observations could be made as to the effect across material types and uncommon laboratory sources.

**X1.1.3** One of the decisions made by the joint committee was on the required sample size needed for assurance of an effective measurement (n=30 versus n=10). It was believed that the greater sample size was necessary to have confidence that data from a destructive test method would result in a statistically accurate statement of variation. This sample size required an extremely high number of samples be made for all laboratories to test all materials and techniques (18 laboratories × 30 samples × 11 techniques). Reducing this number drove the ILS

**TABLE X1.1 Series Descriptions**

Material 1	Material 2	Method <i>n</i> = 30 each	Moving Jaw	Speed, in./min	Sample Sizes
Series “A” Paper Heat Seal Coated (gripped in moving jaw) 50# basis weight	Film Polyester/polyethylene	Unsupported	Paper	8 in.	n=540
		Unsupported		12 in.	30 × 3 = 90 × 6 labs
Series “B” Tyvek 1073B (gripped in moving jaw)	Film Polyester/polyethylene	Supported 90°		12 in.	
		Unsupported	Tyvek	12 in.	n=720
		Supported 180° Supported 90° Reverse 180°		Peak & Avg. Values	30 × 4 = 120 × 6 labs
Series “C” Peelable Film 3 mils	Peelable Film 3 mils	Unsupported	Samples marked	12 in.	n=360
		Supported 180°		12 in.	30 × 2 = 60 × 6 labs
Series “C” Peelable Foil composite 5 mils	Peelable Foil composite 5 mils	Unsupported Supported 180°	Samples marked	12 in. 12 in.	n=360 30 × 2 = 60 × 6 labs

NOTE 1—The tail angle of peel (see Fig. 1 Tail Holding Methods) Unsupported, Supported 90° by hand, Supported 180° (All Series).

NOTE 2—Differences in material flexibility: 3-mil film with a peelable sealant layer versus 5-mil foil composite with same peelable surface (Series “C”).

NOTE 3—Incorrect loading: most flexible supported 180° and least flexible material bent back.

NOTE 4—Crosshead speed range: the standard allows for a range of 8 to 12 in./min (Series “A”).

NOTE 5—Data reported as maximum value across the full width of the peel or average value calculated over the center 80 % of peel length (Series “B”).

**TABLE X1.2 Sample Size Comparisons**

	Table of results with sample sizes <i>n</i> =30					Table of results with sample sizes <i>n</i> =10					$(\frac{10-30}{30}) \cdot 100$	
	<i>S</i> <sub>30</sub>	<i>S</i> <sub>R30</sub>	<i>r</i> <sub>30</sub>	<i>R</i> <sub>30</sub>	Grand Avg <sub>30</sub>	<i>S</i> <sub>10</sub>	<i>S</i> <sub>R10</sub>	<i>r</i> <sub>10</sub>	<i>R</i> <sub>10</sub>	Grand Avg <sub>10</sub>	<i>r</i> <sub>var%</sub>	<i>R</i> <sub>var%</sub>
<b>SERIES A</b>												
Supported 90°	0.0396	0.0473	0.1109	0.1324	0.96	0.0466	0.0552	0.1305	0.1546	0.97	17.71%	16.7 %
Unsupported at 12 in./min	0.0929	0.1286	0.2601	0.3601	1.42	0.0891	0.1221	0.2495	0.3419	1.42	-4.1 %	-5.1 %
Unsupported at 8 in./min	0.1063	0.1488	0.2976	0.4166	1.42	0.0954	0.1513	0.2671	0.4236	1.43	-10.3 %	1.7 %
<b>SERIES B</b>												
PEAK 180° Reverse	0.5536	0.5971	1.5501	1.6719	1.46	0.5744	0.5698	1.6083	1.5954	1.44	3.8 %	-4.6 %
AVG 180° Reverse	0.2560	0.2451	0.7168	0.6863	0.94	0.3985	0.3747	1.1158	1.0492	0.98	55.7 %	52.9 %
PEAK 180°	0.2977	0.3292	0.8336	0.9218	3.24	0.2910	0.3058	0.8148	0.8562	3.24	-2.3 %	-7.1 %
AVG 180°	0.3070	0.3567	0.8596	0.9988	2.99	0.2792	0.3119	0.7818	0.8733	3.00	-9.1 %	-12.6 %
PEAK 90°	0.2629	0.2539	0.7361	0.7109	0.92	0.2794	0.3189	0.7823	0.8929	0.94	6.3 %	25.6 %
AVG 90°	0.1600	0.1599	0.4480	0.4477	0.69	0.1572	0.1949	0.4402	0.5457	0.70	1.7 %	21.9 %
PEAK Unsupported	0.2683	0.2630	0.7512	0.7364	1.71	0.2744	0.2751	0.7683	0.7703	1.71	2.3 %	4.6 %
AVG Unsupported	0.2510	0.2492	0.7028	0.6978	1.45	0.2531	0.2541	0.7087	0.7115	1.43	0.8 %	2.00%
<b>SERIES C</b>												
3 mil Film Unsupported	0.0605	0.1059	0.1694	0.2965	1.70	0.0593	0.0984	0.1660	0.2755	1.69	-2.0 %	-7.1 %
5 mil Foil Unsupported	0.0382	0.0720	0.1070	0.2016	1.21	0.0372	0.0711	0.1042	0.1991	1.21	-2.6 %	-1.3 %
3 mil Film 180°	0.1786	0.3003	0.5001	0.8408	3.46	0.1916	0.3435	0.5365	0.9618	3.51	7.3 %	14.4 %
5 mil Foil 180°	0.3164	0.3476	0.8859	0.9733	4.57	0.2965	0.3447	0.8302	0.9652	4.55	-6.3 %	-0.8 %

into the three independent series shown in Table X1.1. In order to resolve the question of accuracy or confidence in the outcome of the analysis, the data was also analyzed by splitting the data into *n*=30 and *n*=10 using the first ten data points reported by the laboratories. Results in this study are shown in Table X1.2. Overall, the average measured values of the data series differed by less than 0.1 #/in., the “*r*” actually resulted in improved levels or less than 5 % increases in 73 % of the tests run over the 3 series. Reproducibility suffered most in the test for incorrect loading (Series B Reverse) and in the 90° supported tail where a difference in 0.02 in Series A accounted for a 17 % increase and in Series B a 0.1 and 0.18 accounted for 22 to 26 %. Looked at another way, Fig. X1.2 plots the average with ±3 standard deviations for each of the sample

sizes overlapped. This visual image suggests that reporting the *n*=30 result may not show large differences in either reduction or increase in variation.

X1.1.4 By reporting *r* & *R*’s from smaller sample sizes, users of this test method would be capable of measuring their agreement to this test method by running fewer samples, that is, 10 versus 30.

X1.1.5 During the run of the ILS data was reviewed for irregularities when compared to other laboratories. Equipment make and model was reported along with load cell size or range of operation in order to determine if this played a part in any variation increase or decrease. Companies were contacted and issues of proper technique were discussed and resolved. After

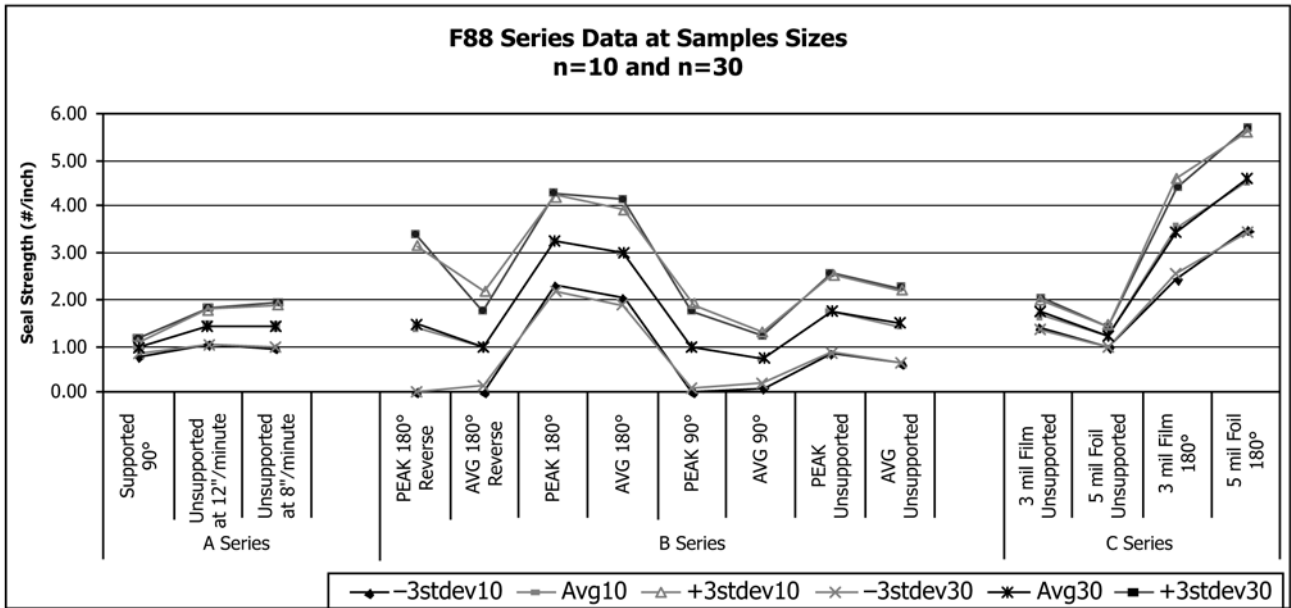


FIG. X1.1 Series Data at Sample Sizes n=10 and n=30.

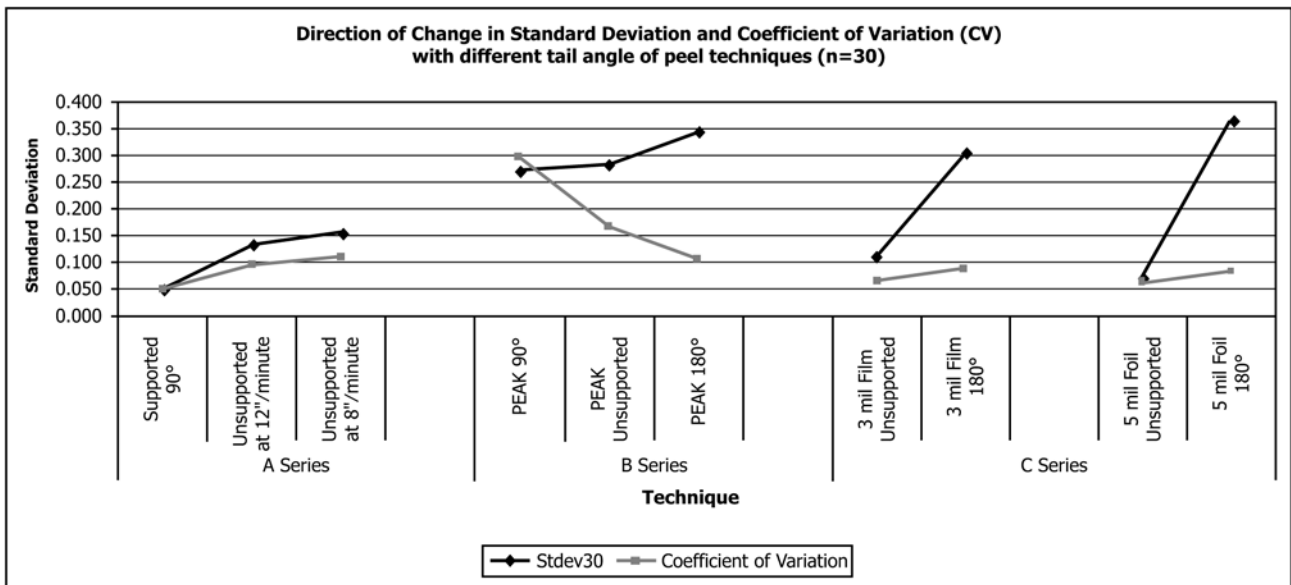


FIG. X1.2 Direction of Change in Standard Deviation with Different Tail Angle of Peel Techniques

a review of the data and the guidance in Practice E691, it was determined that all laboratories and respective data be accepted as proper measures of variability.

X1.1.6 Regarding observations that cross Series material lines, the measures of variation (standard deviation) shown in Fig. X1.1, indicate an increase in variation as techniques change from 90° supported, to unsupported then to 180° supported. It does not appear to be material specific, however the rate of change may be. The measure of Coefficient of

Variation (CV) divides the standard deviation by the average in order to measure the impact of the changes of both measurements. The effect of the increase in variability (standard deviation) is dependent upon the magnitude of the measured values (average). Because the measured values increase substantially in the 180° supported method, the effect of the increase in standard deviation is less than that of the 90° supported data.



*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or [service@astm.org](mailto:service@astm.org) (e-mail); or through the ASTM website ([www.astm.org](http://www.astm.org)). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; <http://www.copyright.com/>*