



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE ANCLAJES EN
ALBAÑILERÍA MEDIANTE EL MÉTODO BAYESIANO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CRISTIÁN EDUARDO ACEVEDO TORRES

PROFESOR GUÍA:
RAFAEL OMAR RUIZ GARCÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES
RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: **CRISTIÁN EDUARDO ACEVEDO TORRES**
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: RAFAEL OMAR RUIZ GARCÍA

CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE ANCLAJES EN ALBAÑILERÍA MEDIANTE EL MÉTODO BAYESIANO

Los anclajes en albañilería son altamente utilizados en todo el mundo para la instalación de elementos no estructurales y de elementos estructurales secundarios, el diseño de estos anclajes ante cargas estáticas se encuentra bien regulado, sin embargo, no existe una normativa clara para su uso ante cargas cíclicas. Con lo anterior, el presente trabajo de título busca proponer una metodología de diseño para dichos anclajes, la cual permita estimar la resistencia máxima cíclica a partir de conocer la resistencia máxima estática, para ello, se cuentan con ensayos de tracción “Fuerza vs Desplazamiento” en distintos tipos de anclaje. A los ensayos experimentales se les ajustan distintas curvas utilizando un método basado en el teorema de Bayes con el fin de obtener la resistencia máxima de las configuraciones de anclajes en estudio y su respectiva incertidumbre asociada.

A partir del estudio de los ensayos experimentales, se obtiene la probabilidad de falla de distintas configuraciones de anclajes en albañilería. Una vez obtenidas las curvas de probabilidad de falla se propone un factor de seguridad que depende del tipo de unidad de albañilería y del tipo de anclaje utilizado (anclaje químico o mecánico), además, para casos particulares en que el tipo de unidad de albañilería es desconocida, se propone un factor de seguridad que solo depende del tipo de anclaje y finalmente se propone un factor de seguridad de forma general para cualquier anclaje en albañilería.

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mi mamá y papá, quienes siempre han dado lo mejor por sus hijos, me han inculcado sus buenos valores y con todo su cariño y amor me han ayudado a ser la persona que soy hoy.

A Joaquín y Alan, por su gran amistad, quienes con su constancia y perseverancia me enseñaron que no existen los límites.

A Fabián, Romina y Carolina quienes siempre me han dado su apoyo y alegrado mis días.

A Camila, quién siempre me ha llenado de amor y alegría en estos últimos años, me ha inspirado y motivado a conseguir todas mis metas.

A Ignacio, por todo su apañe desde que somos chicos. Cuando ingresó a la universidad me ayudó a recuperar mi motivación por el deporte, algo fundamental en mi vida.

A todos mis amigos y amigas que me acompañaron en este paso por la universidad, por todas las alegrías, apoyo, carretes, tardes de estudio, de gimnasio, de fútbol.

Al profesor Rafael Ruiz quien me guó en el cierre de esta gran etapa.

Finalmente, a mi gran y maravillosa familia, siempre me he sentido muy afortunado y agradecido de tener a cada uno de ellos en mi vida.

Tabla de Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Procedimiento Bayesiano para Ajuste de Curvas | 4 |
| 2.1. Método Basado en el Teorema de Bayes | 4 |
| 2.2. Generación de muestras | 8 |
| 2.3. Método de Monte Carlo | 9 |
| 2.4. Probabilidad de falla utilizando el método de Monte Carlo | 10 |
| 3. Descripción de anclajes, modos de falla y datos experimentales disponibles | 12 |
| 3.1. Anclajes en Albañilería | 12 |
| 3.1.1. Descripción general | 12 |
| 3.1.2. Resistencia de diseño. | 14 |
| 3.2. Descripción de ensayos y datos experimentales disponibles de anclajes | 14 |
| 4. Metodología propuesta en estudios anteriores. | 17 |
| 5. Ajuste Datos Experimentales | 20 |
| 5.1. Configuración 1 | 21 |
| 5.1.1. Curva Ajustada Tracción Estático | 21 |
| 5.1.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico | 22 |
| 5.1.3. Probabilidad de Falla a Tracción | 23 |
| 5.2. Configuración 2 | 24 |
| 5.2.1. Curva Ajustada Tracción Estático | 24 |
| 5.2.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico | 25 |
| 5.2.3. Probabilidad de Falla a Tracción | 26 |
| 5.3. Configuración 3 | 27 |
| 5.3.1. Curva Ajustada Tracción Estático | 27 |
| 5.3.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico | 27 |
| 5.3.3. Probabilidad de Falla a Tracción | 28 |
| 5.4. Configuración 4 | 29 |
| 5.4.1. Curva Ajustada Tracción Estático | 29 |
| 5.4.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico | 30 |
| 5.4.3. Probabilidad de Falla a Tracción | 31 |
| 5.5. Configuración 5 | 32 |
| 5.5.1. Curva Ajustada Tracción Estático | 32 |
| 5.5.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico | 32 |
| 5.5.3. Probabilidad de Falla a Tracción | 33 |
| 5.6. Configuración 6 | 35 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.6.1. | Curva Ajustada Tracción Estático | 35 |
| 5.6.2. | Curva Ajustada Tracción Cíclico | 35 |
| 5.6.3. | Probabilidad de Falla a Tracción | 36 |
| 5.7. | Configuración 7 | 37 |
| 5.7.1. | Curva Ajustada Tracción Estático | 37 |
| 5.7.2. | Curva Ajustada Tracción Cíclico | 38 |
| 5.7.3. | Probabilidad de Falla a Tracción | 39 |
| 5.8. | Configuración 8 | 41 |
| 5.8.1. | Curva Ajustada Tracción Estático | 41 |
| 5.8.2. | Curva Ajustada Tracción Cíclico | 41 |
| 5.8.3. | Probabilidad de Falla a Tracción | 42 |
| 5.9. | Configuración 9 | 43 |
| 5.9.1. | Curva Ajustada Tracción Estático | 43 |
| 5.9.2. | Curva Ajustada Tracción Cíclico | 43 |
| 5.9.3. | Probabilidad de Falla a Tracción | 44 |
| 6. | Propuesta Factores de Seguridad | 46 |
| 6.1. | Factor de seguridad a partir de probabilidad de falla. | 46 |
| 6.2. | Comparación Factores de Seguridad de Anclajes Mecánicos y Químicos. | 47 |
| 6.3. | Factor de Seguridad Propuesto. | 48 |
| 6.4. | Esquema de diseño | 50 |
| 6.5. | Conclusiones | 52 |
| | Bibliografía | 53 |
| | Anexo A. Datos experimentales | 55 |
| A.1. | Configuración 1 | 55 |
| A.1.1. | Ensayo Tracción Estático | 55 |
| A.1.2. | Ensayo Tracción Cíclico | 56 |
| A.2. | Configuración 2 | 56 |
| A.2.1. | Ensayo Tracción Estático | 56 |
| A.2.2. | Ensayo Tracción Cíclico | 57 |
| A.3. | Configuración 3 | 57 |
| A.3.1. | Ensayo Tracción Estático | 57 |
| A.3.2. | Ensayo Tracción Cíclico | 58 |
| A.4. | Configuración 4 | 58 |
| A.4.1. | Ensayo Tracción Estático | 58 |
| A.4.2. | Ensayo Tracción Cíclico | 59 |
| A.5. | Configuración 5 | 59 |
| A.5.1. | Ensayo Tracción Estático | 59 |
| A.5.2. | Ensayo Tracción Cíclico | 60 |
| A.6. | Configuración 6 | 60 |
| A.6.1. | Ensayo Tracción Estático | 60 |
| A.6.2. | Ensayo Tracción Cíclico | 61 |
| A.7. | Configuración 7 | 61 |
| A.7.1. | Ensayo Tracción Estático | 61 |
| A.7.2. | Ensayo Tracción Cíclico | 62 |
| A.8. | Configuración 8 | 62 |

| | |
|---|----|
| A.8.1. Ensayo Tracción Estático | 62 |
| A.8.2. Ensayo Tracción Cíclico | 63 |
| A.9. Configuración 9 | 63 |
| A.9.1. Ensayo Tracción Estático | 63 |
| A.9.2. Ensayo Tracción Cíclico | 64 |

Índice de Tablas

| | | |
|------|--|----|
| 3.1. | Cantidad de ciclos según carga aplicada. | 16 |
| 4.1. | Factor de tolerancia K | 18 |

Índice de Ilustraciones

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1. | Modelo predictivo. | 5 |
| 3.1. | Anclajes en albañilería sólida y perforada [2]. | 13 |
| 3.2. | Configuración de ensayos. | 15 |
| 3.3. | Equipo utilizado ensayos de tracción. | 16 |
| 3.4. | Ejemplo de ensayo cíclico. | 16 |
| 4.1. | Contraste bilateral. | 17 |
| 4.2. | Metodología de trabajo propuesta [3]. | 19 |
| 5.1. | Modelo predictivo. | 20 |
| 5.2. | Curva ajustada configuración 1, tracción estático. | 22 |
| 5.3. | Curva ajustada configuración 1, tracción cíclico. | 23 |
| 5.4. | Probabilidad de falla a tracción, configuración 1. | 24 |
| 5.5. | Curva ajustada configuración 2, tracción estático. | 25 |
| 5.6. | Curva ajustada configuración 2, tracción cíclico. | 26 |
| 5.7. | Probabilidad de falla a tracción, configuración 2. | 26 |
| 5.8. | Curva ajustada configuración 3, tracción estático. | 27 |
| 5.9. | Curva ajustada configuración 3, tracción cíclico. | 28 |
| 5.10. | Probabilidad de falla a tracción, configuración 3. | 29 |
| 5.11. | Curva ajustada configuración 4, tracción estático. | 30 |
| 5.12. | Curva ajustada configuración 4, tracción cíclico. | 31 |
| 5.13. | Probabilidad de falla a tracción, configuración 4. | 31 |
| 5.14. | Curva ajustada configuración 5, tracción estático. | 32 |
| 5.15. | Curva ajustada configuración 5, tracción cíclico. | 33 |
| 5.16. | Probabilidad de falla a tracción, configuración 5. | 34 |
| 5.17. | Curva ajustada configuración 6, tracción estático. | 35 |
| 5.18. | Curva ajustada configuración 6, tracción cíclico. | 36 |
| 5.19. | Probabilidad de falla a tracción, configuración 6. | 37 |
| 5.20. | Curva ajustada configuración 7, tracción estático. | 38 |
| 5.21. | Curva ajustada configuración 7, tracción cíclico. | 39 |
| 5.22. | Probabilidad de falla a tracción, configuración 7. | 40 |
| 5.23. | Curva ajustada configuración 8, tracción estático. | 41 |
| 5.24. | Curva ajustada configuración 8, tracción cíclico. | 42 |
| 5.25. | Probabilidad de falla a tracción, configuración 8. | 42 |
| 5.26. | Curva ajustada configuración 9, tracción estático. | 43 |
| 5.27. | Curva ajustada configuración 9, tracción cíclico. | 44 |
| 5.28. | Probabilidad de falla a tracción, configuración 3. | 45 |
| 6.1. | Factor de Seguridad vs Probabilidad de falla, todas las configuraciones. | 47 |
| 6.2. | Factor de Seguridad vs Probabilidad de falla, comparación anclaje mecánico y químico. | 48 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.3. | Factores de seguridad para cada configuración. | 49 |
| 6.4. | Factores de seguridad para anclajes químicos. | 50 |
| 6.5. | Factores de seguridad para anclajes mecánicos. | 50 |
| 6.6. | Esquema de diseño propuesto. | 51 |
| 6.7. | Esquema de diseño propuesto. | 51 |
| 6.8. | Esquema de diseño propuesto. | 51 |
| A.1. | Configuración 1: ensayo tracción estático. | 55 |
| A.2. | Configuración 1: ensayo tracción cíclico. | 56 |
| A.3. | Configuración 2: ensayo tracción estático. | 56 |
| A.4. | Configuración 2: ensayo tracción cíclico. | 57 |
| A.5. | Configuración 3: ensayo tracción estático. | 57 |
| A.6. | Configuración 3: ensayo tracción cíclico. | 58 |
| A.7. | Configuración 4: ensayo tracción estático. | 58 |
| A.8. | Configuración 4: ensayo tracción cíclico. | 59 |
| A.9. | Configuración 5: ensayo tracción estático. | 59 |
| A.10. | Configuración 5: ensayo tracción cíclico. | 60 |
| A.11. | Configuración 6: ensayo tracción estático. | 60 |
| A.12. | Configuración 6: ensayo tracción cíclico. | 61 |
| A.13. | Configuración 7: ensayo tracción estático. | 61 |
| A.14. | Configuración 7: ensayo tracción cíclico. | 62 |
| A.15. | Configuración 8: ensayo tracción estático. | 62 |
| A.16. | Configuración 8: ensayo tracción cíclico. | 63 |
| A.17. | Configuración 9: ensayo tracción estático. | 63 |
| A.18. | Configuración 9: ensayo tracción cíclico. | 64 |

Capítulo 1

Introducción

En distintas estructuras de albañilería se utilizan anclajes para la instalación de revestimientos, tuberías, equipos eléctricos, componentes estructurales secundarios, etc., estos anclajes se caracterizan por ser pernos de sujeción que se anclan a muros de albañilería los cuales además pueden utilizar algún adherente (anclajes químicos). Existe una gran cantidad de configuraciones para estos anclajes (variedad de pernos, adherentes y ladrillos), además, ante cargas estáticas se encuentran regulados en Europa mediante el manual técnico ETAG 029 [1]. Sin embargo, no existe una regulación para los anclajes en albañilería cuando se encuentran solicitados ante cargas cíclicas, en consecuencia, suelen ser altamente cuestionados para sus usos en zonas sísmicas.

La resistencia ante cargas estáticas para anclajes en albañilería se puede determinar fácilmente mediante ensayos monotónicos, por otro lado, realizar ensayos cíclicos es altamente complejo y costoso. Gran parte de estos anclajes son utilizados en estructuras existentes donde algunos tipos de ladrillos utilizados se encuentran obsoletos (por ejemplo: estructuras patrimoniales) o no se puede determinar con facilidad si estos son sólidos, perforados horizontal o verticalmente tal como ocurre con muros empastados, en estos casos solo es factible realizar ensayos estáticos simples in-situ.

Con lo anterior, surge la necesidad de establecer una metodología de diseño para los anclajes de albañilería de manera tal que se pueda estimar la resistencia cíclica máxima de dichos anclajes a partir de conocer la resistencia estática máxima.

A fin de resolver la problemática existente, se cuenta con distintos ensayos de tracción estáticos y cíclicos realizados por el Centro Técnico y Científico Francés para Construcción (CSTB) los cuáles fueron facilitados por el profesor del INSA de Lyon Fabien Delhomme. A partir de los resultados experimentales se ajustarán diversas curvas para lograr caracterizar la resistencia máxima y la incertidumbre que existe en dichos valores. Finalmente, se procederá a proponer una metodología que permita el diseño de anclajes ante cargas cíclicas de forma segura.

La importancia de realizar este tipo de análisis nace debido a que al analizar un set de datos, lo que generalmente se suele realizar es una estimación de mínimos cuadrados (regresión lineal) [13] o una estimación de máxima verosimilitud (MLE)[12]. Estos tipos de análisis entregan un único set de parámetros que se ajustan de manera aproximada a los

datos en estudio, lo cual es cuestionable debido a que se desconoce el grado de confiabilidad que se le puede otorgar a dichos parámetros[1]. Lo que se busca no es un set de parámetros, si no que, un rango en el cual se pueda encontrar cada uno de los parámetros ajustados, de esta manera se determinará el escenario más probable, el escenario más adverso, etc., teniendo en cuenta la incertidumbre en cada parámetro estimado, lo cual se puede realizar mediante una inferencia bayesiana que será explicada en los capítulos posteriores.

Objetivo General

El objetivo general del trabajo de título es obtener un esquema de diseño que permita estimar la resistencia a tracción cíclica de una determinada configuración de anclaje en albañilería a partir de conocer su resistencia estática, para ello, se implementa un método de ajuste basado en el Teorema de Bayes. Cabe destacar que estos ensayos fueron realizados por el Centro Técnico y Científico Francés para Construcción (CSTB) y fueron facilitados por el profesor del INSA de Lyon Fabien Delhomme.

Objetivos específicos

- Ajustar una curva a los gráficos de “Tensión vs Deformación” que permita conocer la resistencia media máxima de los anclajes en estudio, identificando la incertidumbre existente en cada una de ellas.
- Identificar la resistencia máxima de tracción cíclica y estática de distintos anclajes de albañilería en función de la probabilidad de excedencia.
- Proponer distintos esquemas que permitan estimar la resistencia a tracción cíclica máxima de distintos anclajes en albañilería según la unidad de albañilería utilizada y/o el tipo de anclaje (químico o mecánico).

Se trabaja sólo con datos experimentales existentes y no se realizan nuevos ensayos, estos datos experimentales fueron digitalizados mediante un software, pues, no se encuentran tabulados ni en formato digital, por lo tanto, existe un pequeño error asociado a la transcripción de los datos.

A partir de los datos experimentales obtenidos para uno de los ensayos en estudio, se propone una ecuación que represente a grandes rasgos el comportamiento del ensayo, luego, se procede a aplicar un método de ajuste basado en el Teorema de Bayes obteniendo como resultado los parámetros característicos de la ecuación propuesta con su respectiva incertidumbre. Lo anterior se repite para diversas ecuaciones propuestas hasta encontrar el mejor ajuste a los datos experimentales en estudio, una vez obtenido el mejor ajuste, se procede a obtener la probabilidad de falla del anclaje. Se repite el procedimiento para los ensayos restantes. Para finalizar, se estudian los resultados obtenidos, se busca una relación entre la resistencia máxima estática y cíclica de los anclajes y se procede a relacionar el comportamiento del anclaje en función de sus características.

Como resultados, se constará con un set de curvas con su respectiva incertidumbre que permita un ajuste de los datos experimentales de cada uno de los ensayos realizados, así, se podrá definir la resistencia máxima que presentarán diversos tipos de anclajes en albañilería con un cierto grado de confiabilidad lo cual será representado con un gráfico de “Probabilidad de Falla vs Resistencia Máxima” . Lo anterior permitirá que distintos usuarios puedan justificar o no el uso de anclajes en albañilería en determinados proyectos de ingeniería.

Finalmente se propondrá una metodología que permita estimar la resistencia cíclica máxima de anclajes en albañilería a partir de conocer la resistencia máxima estática y algunas características del anclaje.

Capítulo 2

Procedimiento Bayesiano para Ajuste de Curvas

2.1. Método Basado en el Teorema de Bayes

Se han realizado diversos estudios para conocer el comportamiento de los anclajes en albañilería, parte de ellos se basan principalmente en ajuste por mínimos cuadrados, algunos ejemplos se pueden observar en [7] y [8]. También se han realizado ajustes basados en distribuciones normales y log-normales [3]. El problema que existe en los análisis mencionados es que sólo entregan un único set de parámetros que se ajustan de manera aproximada a los datos en estudio, además, no se conoce el grado de confiabilidad que se les puede otorgar[9]. Lo anterior es de suma importancia debido a que el comportamiento de los anclajes de albañilería presenta grandes dispersiones por la cantidad de factores que influyen tal como la unidad de albañilería, el tipo de perno y el tipo de adherente utilizados[3]. Debido a lo anterior, se busca utilizar otros métodos de ajuste, como el método basado en el Teorema de Bayes el cual se denomina inferencia bayesiana (“Bayesian Updating” en inglés). Para implementar el método se requiere un modelo predictivo de la respuesta de los anclajes de albañilería, una suposición de la dispersión que tendrá la predicción, una función de densidad de probabilidad y datos experimentales de la respuesta de anclajes en albañilería. Para finalizar, se comparan diversos enfoques como estimaciones de máximo a posteriori y máxima verosimilitud, posteriormente, se procede a aproximar la función de densidad de probabilidad mediante un método de simulación estocástico avanzado tal como es el caso del TMCMC (“Transitional Markov Chain Monte Carlo”)[10].

Para explicar el concepto y las fórmulas para emplear la inferencia bayesiana se utiliza como referencia lo indicado en el artículo [11]. Primero, se debe tener presente el modelo predictivo en estudio, en la *figura 2.1* se puede observar a grandes rasgos el sistema donde “u” representa los parámetros de entrada (por ejemplo datos experimentales), “ θ ” representa los parámetros del modelo y “z” son los datos de salida del modelo. El parámetro “z” es determinista, lo que significa que para cada valor de “u” y “ θ ” existirá un único valor “z”. Como la función de salida “z” es determinista, para obtener un modelo probabilístico que incluya la incertidumbre existente entre los resultados reales y los obtenidos por el modelo, es necesario añadir un error “e” a la función, con esto, se obtiene una nueva función la cual se denominará “y”:

$$y = z(\theta, u) + e \quad (2.1)$$

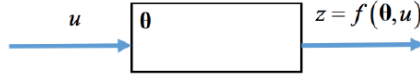


Figura 2.1: Modelo predictivo.

En el caso de la ingeniería civil, es de interés obtener un modelo que logre abarcar los casos más críticos (de mayor sollicitación), a modo de obtener un modelo conservador que represente el comportamiento de un determinado elemento o material. La entropía de la información es una medida que hace referencia a la incertidumbre que existe en una fuente de información, como el modelo que se quiere utilizar tiene que ser el más conservador posible, se busca utilizar un modelo con la mayor entropía de información. Acorde al principio de máxima entropía, cuando se conoce la media y la desviación estándar de una variable aleatoria, la distribución Gaussiana es la que presenta la máxima entropía de información [14], así, el error será representado por una función de densidad de probabilidad la cual se considerará como una distribución Gaussiana ($e \sim N(0, \sigma_e^2)$), de esta forma, la función “y” se puede expresar como el siguiente modelo probabilístico:

$$p(y) \sim N(f(\theta, u), \sigma_e^2) \quad (2.2)$$

Si ahora se asume que se conocen los parámetros “ θ ” y “ u ”, el modelo probabilístico queda dado por:

$$p(y|\theta, u) \sim N(f(\theta, u), \sigma_e^2) \quad (2.3)$$

Al ser una distribución normal, por definición queda expresada por:

$$p(y|\theta, u) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_e^2 2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_e^2} (y - f(\theta, u))^2\right) \quad (2.4)$$

Ahora, el caso de interés es cuando se tiene una cantidad M de mediciones del sistema (ensayos de tensión-deformación), teniendo así, M valores de entrada y M valores de salida:

$$\begin{aligned} \hat{u}_1 &\rightarrow \hat{y}_1 \\ \hat{u}_2 &\rightarrow \hat{y}_2 \\ &\vdots \\ \hat{u}_M &\rightarrow \hat{y}_M \end{aligned} \quad (2.5)$$

Al evaluar los valores anteriores en el modelo probabilístico de la *ecuación 2.4* se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
p(\hat{y}_1|\theta, \hat{u}_1) &= \frac{1}{\sqrt{\sigma_e^2 2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_e^2}(\hat{y}_1 - f(\theta, \hat{u}_1))^2\right) \\
p(\hat{y}_2|\theta, \hat{u}_2) &= \frac{1}{\sqrt{\sigma_e^2 2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_e^2}(\hat{y}_2 - f(\theta, \hat{u}_2))^2\right) \\
&\vdots \\
p(\hat{y}_M|\theta, \hat{u}_M) &= \frac{1}{\sqrt{\sigma_e^2 2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_e^2}(\hat{y}_M - f(\theta, \hat{u}_M))^2\right)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Siguiendo el principio de máxima entropía, la mayor incertidumbre viene dada cuando no existe una correlación entre las M medidas, así, se obtiene la denominada función de verosimilitud (likelihood function) como se indica a continuación:

$$p(\hat{Y}|\theta, \hat{U}) = p(\hat{y}_1|\theta, \hat{u}_1) \cdot p(\hat{y}_2|\theta, \hat{u}_2) \dots p(\hat{y}_M|\theta, \hat{u}_M) \tag{2.7}$$

Reemplazando las *ecuaciones 2.6* en la *ecuación 2.7* se obtiene:

$$\begin{aligned}
p(\hat{Y}|\theta, \hat{U}) &= \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_e^2 2\pi}}\right)^M \cdot \exp\left(\sum_{i=1}^M -\frac{1}{2\sigma_e^2}(\hat{y}_i - f(\theta, \hat{u}_i))^2\right) \\
p(\hat{Y}|\theta, \hat{U}) &= \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_e^2 2\pi}}\right)^M \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_e^2} \sum_{i=1}^M (\hat{y}_i - f(\theta, \hat{u}_i))^2\right)
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Los valores de θ no se conocen realmente si no que se estiman a partir de los datos experimentales. Se propaga la incertidumbre en θ mediante el teorema de las probabilidades totales y se obtiene lo siguiente:

$$P(\hat{Y}|\hat{U}) = \int p(\hat{Y}|\theta, \hat{U})p(\theta)d\theta \tag{2.9}$$

Se puede observar que $D = \hat{Y}|\hat{U}$ corresponde a valores conocidos que pueden obtenerse de datos experimentales. Lo que interesa ahora es obtener un modelo predictivo de los valores de θ con los datos experimentales conocidos tal que la diferencia entre los datos medidos y los precedidos sean mínimos, para ello, se utiliza el teorema de Bayes:

$$p(\theta|D) = \frac{p(D|\theta)p(\theta)}{P(D)} = \frac{p(D|\theta)p(\theta)}{\int p(D|\theta)p(\theta)d\theta} \tag{2.10}$$

La función anterior se conoce como probabilidad a posteriori (posterior PDF en inglés) y permite obtener la función de densidad de probabilidad de θ dado los datos experimentales “D”.

Los términos de la *ecuación 2.10* son conocidos por lo siguientes nombres:

- $p(\theta|D)$ es conocido como “posterior”.
- $p(D|\theta)$ es conocido como “likelihood”.
- $p(\theta)$ es conocido como “prior”.
- $\int p(D|\theta)p(\theta)d\theta$ es conocido como “evidence”.

Los valores máximos del “posterior” $p(\theta|D)$ son:

- **Máxima verosimilitud (MLE: Maximum Likelihood Estimate):**

Corresponde a los parámetros que maximizan la función de verosimilitud para los datos experimentales “D”. Se considera que no existe información de $p(\theta)$ en la *ecuación 2.9*, considerandola como una función de densidad de probabilidad uniforme continua. Finalmente se define:

$$\theta_{MLE} = arg \max[p(\hat{Y}|\hat{U}, \theta)] \quad (2.11)$$

La *ecuación 2.11* se puede expresar en términos logarítmicos con el fin de facilitar el comportamiento numérico de la ecuación al trabajar en distintos programas computacionales:

$$\theta_{MLE} = arg \max[\log(p(\hat{Y}|\hat{U}, \theta))] \quad (2.12)$$

- **Máximo a Posteriori (MAP):**

Parámetro análogo a MLE sólo que ahora se tiene en cuenta la información entregada por $p(\theta)$:

$$\theta_{MAP} = arg \max[p(\hat{Y}|\hat{U}, \theta)p(\theta)] \quad (2.13)$$

Luego, expresando la *ecuación 2.13* en términos logarítmicos:

$$\theta_{MAP} = arg \max[\log(p(\hat{Y}|\hat{U}, \theta)p(\theta))] \quad (2.14)$$

Con lo anterior, es posible obtener los valores θ más representativos los cuales representan la moda del *posterior*. Es posible conocer el intervalo en donde fluctúan los valores θ mediante la generación de muestras, lo cual se explicará en detalle en las secciones 2.2 y 2.3.

Una vez sean conocidas las funciones de probabilidad que definen el comportamiento de θ se procede a obtener un modelo que represente el sistema original (*ecuación 2.1*) a partir de los datos experimentales y un valor de entrada “u”:

$$p(y|u, D) = \int p(y|u, D, \theta)p(\theta|u, D)d\theta \quad (2.15)$$

Si ahora se considera desconocido el input “u” y se propaga su incertidumbre se obtiene lo siguiente:

$$p(y|D) = \int \int p(y|u, \theta)p(\theta|D)p(u)d\theta du \quad (2.16)$$

Al considerar la propagación del error se tiene la siguiente ecuación:

$$p(y|D) = \int \int p(y|u, \theta) p(\theta|D) p(u) p(e) d\theta du de \quad (2.17)$$

Donde:

$$p(e) \rightarrow N(0, \sigma_e^2) \quad (2.18)$$

Donde σ_e corresponde a la desviación estándar del error, si se considera un error estacionario este queda definido por:

$$\sigma_e^2 = J(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\hat{y}_i - f(\theta, \hat{u}_i))^2 \quad (2.19)$$

Dicho lo anterior, se busca resolver la *ecuación 2.17*, esto se puede resolver utilizando distintos métodos numéricos tal como el método de Monte Carlo, la expansión de Taylor, el método asintótico de la integral de Laplace, etc., para ello, es importante realizar una adecuada generación de muestras lo cual se explicará en las siguientes secciones.

2.2. Generación de muestras

La generación de muestras es una metodología utilizada con el fin de encontrar la distribución que tiene una función de densidad de probabilidad (PDF). Existen distintos métodos, a continuación se mencionará uno de ellos el cual se puede ver en mayor detalle en [12].

Cadenas de Markov

Corresponden a una técnica avanzada de simulación estocástica, es de gran utilidad para la generación de muestras de distribuciones complejas como las que se requieren resolver mediante el método bayesiano.

Una cadena de Markov (MC: Markov Chain), es una secuencia de variables aleatorias tal que la muestra generada depende de la muestra generada anteriormente, en la *ecuación 2.20* queda expresado lo anterior.

$$p(x^{k+1}|x^k, \dots, x^1) = p(x^{k+1}|x^k) \quad (2.20)$$

Una cadena de Markov queda completamente definida con la función de probabilidad de transición ($p_t(x^{k+1}|x^k)$) y el PDF inicial $p(x^1)$. Se puede propagar iterativamente la incertidumbre de las muestras anteriores obtenido para $k + 1$ lo siguiente:

$$p(x^{k+1}) = \int p_t(x^{k+1}|x^k) p(x^k) dx^k \quad (2.21)$$

2.3. Método de Monte Carlo

El método de Monte Carlo es uno de los algoritmos que existen con el fin de encontrar la solución aproximada de la siguiente integral:

$$H = E[g(x)] = \int f(x)p(x)dx \quad (2.22)$$

Para realizar lo anterior se realizan los siguientes pasos:

- Se generan N muestras (x^j con $j = 1, \dots, N$) donde x_j sigue la distribución $p(x)$.
- Se evalúan las N muestras generadas en la función $f(x)$.
- Finalmente el valor de H viene dado por:

$$\hat{H} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(x^j) \quad (2.23)$$

El algoritmo anterior se puede realizar K veces, de modo que $\hat{H}_1, \hat{H}_2, \dots, \hat{H}_k$ es cercano a H según la cantidad de muestras N utilizadas, con esto se tienen las siguientes propiedades:

- El valor estimado \hat{H} sigue un PDF gaussiano donde se tiene que el valor esperado y la varianza es:

$$E[\hat{H}] = H \quad (2.24)$$

$$Var[\hat{H}] = \frac{1}{K} Var[f(x)] \quad (2.25)$$

- El coeficiente de variación del método de Monte Carlo (COV_{MC}) hace referencia a la calidad de los valores estimados al utilizar Monte Carlo. En base a la experiencia, se considerará un “ $COV_{MC} < 8\%$ ” como una buena calidad de la estimación. El COV_{MC} se calcula según lo indicado en la *ecuación 2.26*.

$$COV_{MC} = \frac{COV_f}{\sqrt{K}} \quad (2.26)$$

- El parámetro COV_f se puede obtener a partir de muestras utilizando la siguiente ecuación:

$$COV_f = \frac{\sqrt{Var[f(x)]}}{E[f(x)]} \quad (2.27)$$

Donde:

$$E[f(x)] \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(x^j) \quad (2.28)$$

$$E[f(x)^2] \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (f(x^j))^2 \quad (2.29)$$

$$Var[g(x)] = E[f(x)^2] - (E[f(x)])^2 \quad (2.30)$$

Finalmente se tiene:

$$COV_{MC} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (f(x^j))^2 - (\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(x^j))^2}}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(x^j)} \quad (2.31)$$

El método de Monte Carlo se puede utilizar generando muestras de distintas maneras, en particular, si estas muestras se generan mediante las “Cadenas de Markov”, al método se le conoce como MCMC (Markov Chain Monte Carlo).

2.4. Probabilidad de falla utilizando el método de Monte Carlo

Se define como “probabilidad de falla” a la probabilidad de que la función objetivo ($f(x)$ en la ecuación 2.22) sea mayor a un valor límite predefinido (LIM). De esta forma, la probabilidad de falla queda expresada por las siguientes ecuaciones:

$$P_F = \int_X I_F(x)p(x)dx \quad (2.32)$$

En donde:

$$I_F(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < LIM \\ 1 & \text{si } x \geq LIM \end{cases} \quad (2.33)$$

Al utilizar distintas muestras generadas, la ecuación 2.32 se estima mediante:

$$\hat{P}_F = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_F(x^j) \quad (2.34)$$

Donde x_j es la muestra j -ésima ($j = 1, 2, \dots, N$).

Con lo anterior, se puede obtener gráficamente la probabilidad de falla de 0% a 100% mediante el siguiente algoritmo:

- Generar muestras de $p(x)$ (ver *ecuación 2.22*).
- Evaluar las muestras obtenidas en $f(x)$.
- Ordenar $f(x_j)$ de mayor a menor.
- Construir probabilidad de falla P_F como vector $[\frac{1}{N}, \frac{2}{N}, \dots, \frac{N}{N}]$.
- Finalmente se debe graficar el vector construido en el paso anterior (P_F) en función del vector $f(x_j)$ de mayor a menor.

Capítulo 3

Descripción de anclajes, modos de falla y datos experimentales disponibles

3.1. Anclajes en Albañilería

3.1.1. Descripción general

Los anclajes de inyección en albañilería son ampliamente utilizados para el anclaje de revestimientos, barandas de seguridad, elementos estructurales secundarios y equipamiento técnico (tuberías, cables de electricidad, etc.) en casas y edificios nuevos o existentes. Si bien, estos anclajes han sido utilizados desde al menos los últimos 40 años[1], existen pocas normativas estándar que hacen referencia al comportamiento de los anclajes en albañilería ante cargas sísmicas[3].

En Chile, la regulación de los anclajes en albañilería viene dada por la “NTM 001: Diseño sísmico de componentes y sistemas no estructurales”, en la cuál se indica textualmente lo siguiente:

“7.2.3. Anclajes post instalados en hormigón y albañilería. Los anclajes postinstalados deben estar precalificados para aplicaciones sísmicas de acuerdo a ACI 355.2 u otros procedimientos de calificación estandarizados reconocidos a nivel nacional”[11].

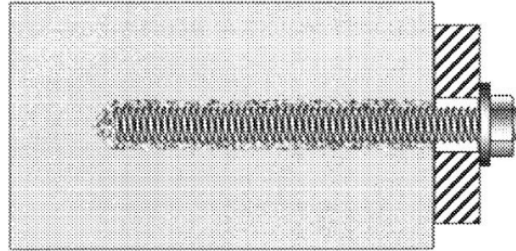
La ACI 355.2 no se utiliza para anclajes en albañilería puesto que se refiere exclusivamente a los anclajes post instalados en hormigón. Respecto a los procedimientos estandarizados, existen distintos manuales de uso recomendados por los proveedores para la correcta instalación de anclajes en albañilería. Fueron regulados por primera vez en Europa con el documento ETAG 029 [2] donde se encuentran bien definidos para cargas estáticas, sin embargo, para cargas cíclicas no se poseen valores o fórmulas recomendadas para su diseño. Por lo tanto, para justificar el uso de anclajes en albañilería en un proyecto, se deben realizar ensayos sísmicos, lo cual es un proceso poco práctico y a la vez costoso [3].

Los anclajes en albañilería se componen principalmente por:

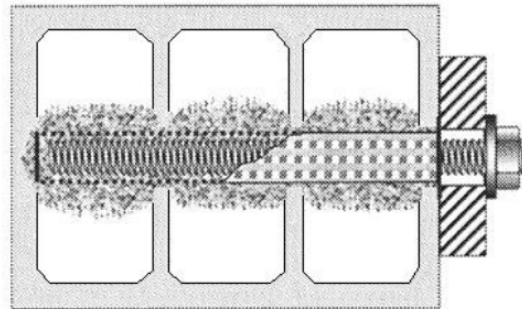
- **Material Base:** Corresponde a la unidad de albañilería donde se va a realizar el anclaje, generalmente es de arcilla o concreto. Geométricamente, corresponden a bloques rectangulares que pueden ser sólidos o poseer perforaciones horizontales o verticales.

- **Perno:** Corresponde a la pieza de acero que se utiliza para el anclaje, puede ser complementada con un tarugo plástico según el tipo de unidad de albañilería.
- **Mortero de fijación:** Es el material químico que se utiliza para anclar el perno a la unidad de albañilería.

En la *figura 3.1* se observa un ejemplo de anclajes tanto para albañilería sólida como perforada.



(a) Anclaje compuesto por unidad de albañilería sólida y mortero de fijación.



(b) Anclaje compuesto por unidad de albañilería perforada, tarugo y mortero de fijación.

Figura 3.1: Anclajes en albañilería sólida y perforada [2].

Si bien los anclajes de inyección en albañilería cumplen la misma función que en hormigón, su comportamiento físico difiere en muchos aspectos debido a la falta de homogeneidad que tienen las unidades de albañilería, existiendo así, un amplio rango en la resistencia de las unidades de albañilería a compresión, las cuales fluctúan entre los 1.6 a 40 [MPa][1]. Además, la cantidad de configuraciones de anclajes que existen es sumamente amplia, donde puede variar el tipo de perno, el tipo de mortero de fijación, y el tipo de unidad de albañilería a utilizar.

Los tipos de falla de los anclajes de fijación en albañilería han sido ampliamente investigados por Meyer [4] y Welz [5]. Meyer se ha enfocado en las fallas producidas por la tracción del anclaje mientras que Welz se ha enfocado en las fallas de corte.

3.1.2. Resistencia de diseño.

A modo general, se define en el documento ETAG029 [2] que la resistencia de diseño R_d , debe ser mayor que la fuerza solicitante S_d :

$$S_d \leq R_d \quad (3.1)$$

Donde la fuerza solicitante viene dada por la resistencia característica del anclaje R_k dividida por un factor de seguridad γ_M que viene dado por el tipo de material ($\gamma_M = 2.5$ en albañilería).

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (3.2)$$

3.2. Descripción de ensayos y datos experimentales disponibles de anclajes

Se cuenta con distintos ensayos en anclajes de albañilería realizados por el CSTB los cuáles fueron proporcionados por el profesor del INSA Lyon Fabien Delhomme. En total se cuenta con 9 configuraciones diferentes (*ver figura 3.2*) y se trabaja con 2 tipos de ensayos:

1. Ensayo de tracción estático.
2. Ensayo de tracción cíclico.

Cada uno de los ensayos mencionados anteriormente se realizan para todas las configuraciones, lo cuál da un total de 18 ensayos distintos cuyo detalle se puede encontrar en Anexos.

| Foto | Configuración | Ladrillo | Anclaje | Ensayo | Total de Ensayos |
|---|---------------|-----------------------------------|---------------|-------------------|------------------|
|  | 1 | Arcilla sólido | Hilti HRD10 | Tracción Estático | 5 |
| | | | | Tracción Cíclico | 5 |
|  | 2 | Arcilla perforado verticalmente | Spi B-long | Tracción Estático | 5 |
| | | | | Tracción Cíclico | 5 |
|  | 3 | Arcilla perforado verticalmente | Fis HT | Tracción Estático | 5 |
| | | | | Tracción Cíclico | 5 |
|  | 4 | Arcilla perforado horizontalmente | Etanco FM10X8 | Tracción Estático | 5 |
| | | | | Tracción Cíclico | 5 |
|  | 5 | Arcilla perforado horizontalmente | Fis HT | Tracción Estático | 5 |
| | | | | Tracción Cíclico | 5 |
|  | 6 | Hormigón perforado verticalmente | Fischer 8-XR | Tracción Estático | 5 |
| | | | | Tracción Cíclico | 5 |
|  | 7 | Hormigón perforado verticalmente | Simpson AT-HP | Tracción Estático | 5 |
| | | | | Tracción Cíclico | 5 |
|  | 8 | Hormigón sólido | Wurth-10 | Tracción Estático | 5 |
| | | | | Tracción Cíclico | 5 |
|  | 9 | Hormigón sólido | Simpson AT-HP | Tracción Estático | 5 |
| | | | | Tracción Cíclico | 5 |

Figura 3.2: Configuración de ensayos.

En la *figura 3.3* se puede observar el equipo utilizado para realizar los ensayos de tracción.



Figura 3.3: Equipo utilizado ensayos de tracción.

Para realizar los ensayos cíclicos, se tiene como input la resistencia máxima estática del anclaje (Re_{max}). En la *tabla 3.1* se define la fuerza aplicada por el equipo en distintos ciclos lo cual se aprecia gráficamente en la *figura 3.4*.

Tabla 3.1: Cantidad de ciclos según carga aplicada.

| Carga | Ciclos |
|-----------------|--------|
| 10 % Re_{max} | 25 |
| 15 % Re_{max} | 15 |
| 20 % Re_{max} | 5 |
| 25 % Re_{max} | 5 |
| 30 % Re_{max} | 5 |
| 35 % Re_{max} | 5 |
| 40 % Re_{max} | 5 |
| 45 % Re_{max} | 5 |
| 50 % Re_{max} | 5 |

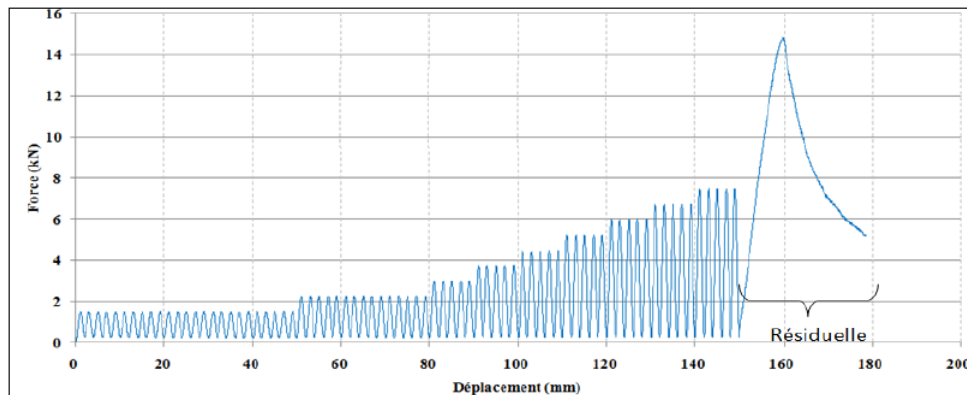


Figura 3.4: Ejemplo de ensayo cíclico.

Capítulo 4

Metodología propuesta en estudios anteriores.

En enero de 2020 se realizó un estudio estadístico [3] con los datos experimentales que se comentaron en la sección 3.2. En este estudio, se asume que la resistencia máxima de los ensayos se distribuye de manera log-normal, debido a que, es la distribución que maximiza la entropía (caso conservador) y a diferencia de una distribución normal, contiene sólo valores positivos. Luego, a partir de la mediana y la desviación estándar de los 5 ensayos realizados para cada configuración se procede a obtener el valor característico (resistencia) con una probabilidad de excedencia del 95 % (contraste bilateral con $\frac{\alpha}{2} = 5\%$, ver figura 4.1).

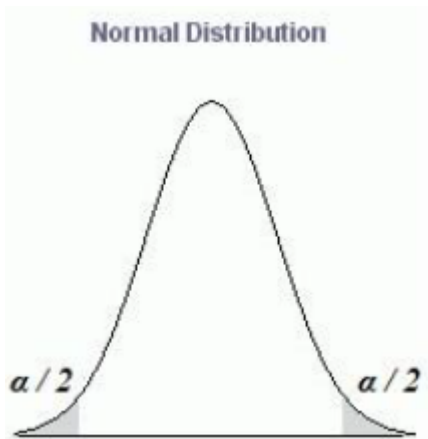


Figura 4.1: Contraste bilateral.

Para el caso en estudio, el valor característico hace referencia a la resistencia máxima de un determinado anclaje con una probabilidad de excedencia del 95 % para una distribución log-normal y se obtiene a partir de la *fórmula 4.1*.

$$C = me^{-K\sigma} \quad (4.1)$$

Donde m corresponde al promedio, σ corresponde a la desviación estándar, y K corresponde al factor de tolerancia para una probabilidad de excedencia del 95 %. El valor de K varía según la cantidad de muestras tal como se presenta a continuación:

Tabla 4.1: Factor de tolerancia K

| N° de ensayos | K | N° de ensayos | K | N° de ensayos | K |
|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| 3 | 5.311 | 15 | 2.329 | 27 | 2.109 |
| 4 | 3.957 | 16 | 2.299 | 28 | 2.099 |
| 5 | 3.400 | 17 | 2.272 | 29 | 2.089 |
| 6 | 3.092 | 18 | 2.249 | 30 | 2.080 |
| 7 | 2.894 | 19 | 2.227 | 35 | 2.041 |
| 8 | 2.754 | 20 | 2.208 | 40 | 2.010 |
| 9 | 2.650 | 21 | 2.190 | 45 | 1.986 |
| 10 | 2.568 | 22 | 2.174 | 50 | 1.965 |
| 11 | 2.503 | 23 | 2.159 | 60 | 1.933 |
| 12 | 2.446 | 24 | 2.145 | 120 | 1.841 |
| 13 | 2.402 | 25 | 2.132 | 240 | 1.780 |
| 14 | 2.363 | 26 | 2.120 | ∞ | 1.645 |

A partir de lo anterior se propuso una metodología para obtener un factor de seguridad que se detalla en la siguiente imagen:

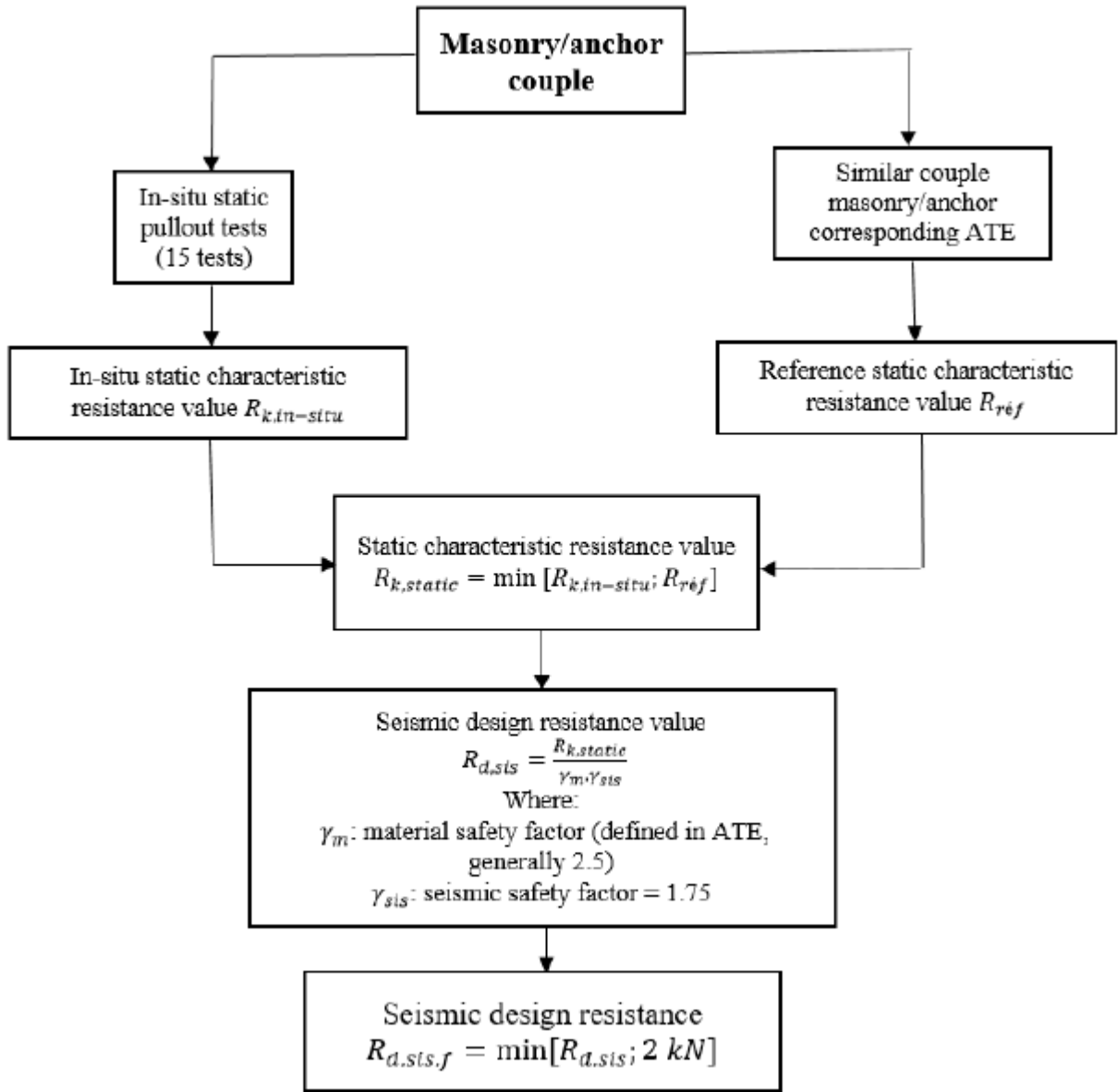


Figura 4.2: Metodología de trabajo propuesta [3].

Capítulo 5

Ajuste Datos Experimentales

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar los ajustes realizados a los ensayos experimentales mencionados en la *sección 3.2*, para ello, se presentarán los gráficos generados de las curvas ajustadas a los datos experimentales y la probabilidad de falla de cada una de las configuraciones en estudio.

Modelo de Ajuste

El modelo predictivo “ $f(\theta, u)$ ” a utilizar (ver *figura 2.1*) corresponde a una función compuesta por 6 líneas rectas tal como se describe en la *figura y ecuación 5.1*. El modelo anterior fue seleccionado debido a que es uno de los que mejor se adapta a los datos experimentales en estudio.

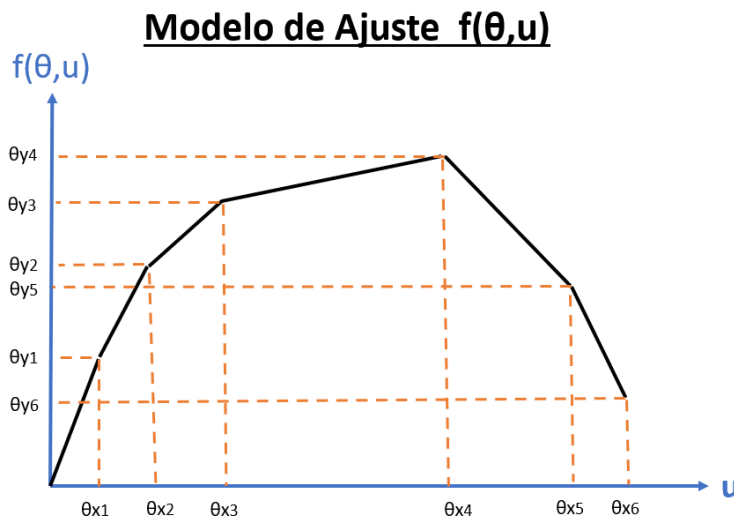


Figura 5.1: Modelo predictivo.

$$\begin{aligned}
f(\theta, u) &= \frac{\theta y_1}{\theta x_1} u && \text{Para } u < \theta x_1 \\
f(\theta, u) &= \frac{\theta y_2 - \theta y_1}{\theta x_2 - \theta x_1} (u - \theta x_1) + \theta y_1 && \text{Para } \theta x_1 < u < \theta x_2 \\
f(\theta, u) &= \frac{\theta y_3 - \theta y_2}{\theta x_3 - \theta x_2} (u - \theta x_2) + \theta y_2 && \text{Para } \theta x_2 < u < \theta x_3 \\
f(\theta, u) &= \frac{\theta x_4 - \theta y_3}{\theta x_4 - \theta x_3} (u - \theta x_3) + \theta y_3 && \text{Para } \theta x_3 < u < \theta x_4 \\
f(\theta, u) &= \frac{\theta y_5 - \theta y_4}{\theta x_5 - \theta x_4} (u - \theta x_4) + \theta y_4 && \text{Para } \theta x_4 < u < \theta x_5 \\
f(\theta, u) &= \frac{\theta y_6 - \theta y_5}{\theta x_6 - \theta x_5} (u - \theta x_5) + \theta y_5 && \text{Para } \theta x_5 < u < \theta x_6
\end{aligned} \tag{5.1}$$

5.1. Configuración 1

5.1.1. Curva Ajustada Tracción Estático

En la *figura 5.2* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción estática de la configuración 1 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de arcilla sólido (ver *figura 3.2*). Para obtener la curva que mejor representa los valores experimentales ajustados, se procede a calcular los valores θ_{MAP} según se indica en la *ecuación 2.14*, el valor de la función densidad de probabilidad $p(\theta)$ se estima a partir de los datos experimentales representados por las curvas verdes en la *figura 5.2*. Con lo anterior, se utiliza el método MCMC (Markov Chain Monte Carlo) tal como se describe en las secciones 2.2 y 2.3. Se obtiene la curva roja continua que representa el ajuste central de los datos y las curvas rojas punteadas que representan el área donde se encuentra la curva ajustada con una confiabilidad del 90%. Para finalizar, las curvas azules representan el error de la curva ajustada con una confiabilidad del 90%, para ello se utilizan las *ecuaciones 2.18 y 2.19*. La metodología empleada para las 8 configuraciones restantes es análoga tanto para el caso estático como el cíclico, se mantiene la notación de colores antes mencionada.

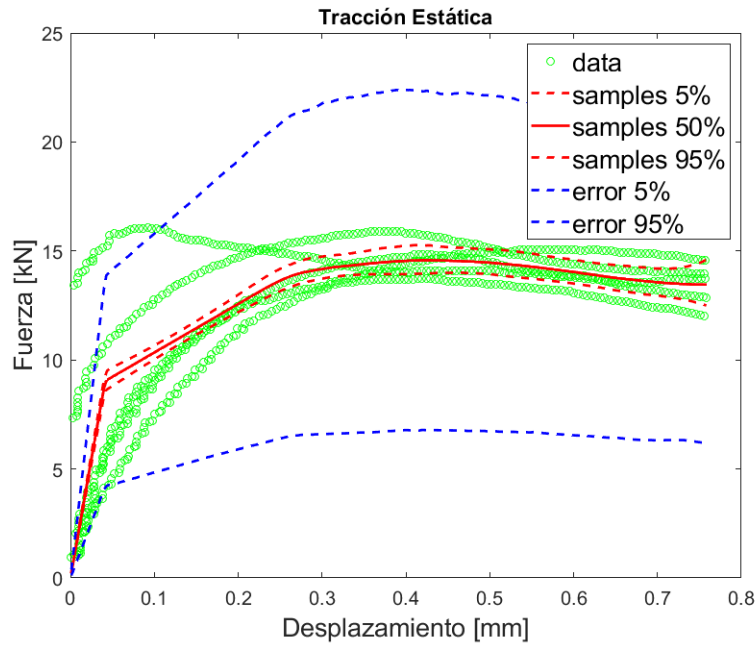


Figura 5.2: Curva ajustada configuración 1, tracción estático.

En la *figura 5.2* se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos tal como es esperado. Las curvas azules abarcan prácticamente la totalidad de los datos experimentales, sin embargo, para valores de desplazamiento mayor a 0.2, se obtiene una gran dispersión en el error. Para finalizar, se observa que no todas las curvas experimentales parten en (0,0), posiblemente se debe a un error al momento de registrar los resultados experimentales.

5.1.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico

En la *figura 5.3* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción cíclica de la configuración 1 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de arcilla sólido (ver *figura 3.2*).

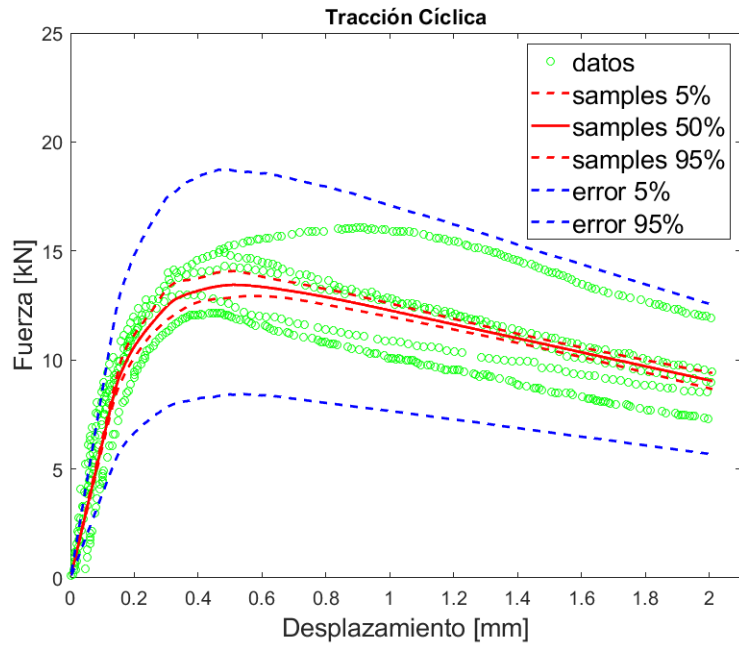


Figura 5.3: Curva ajustada configuración 1, tracción cíclica.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que existe poca dispersión respecto a los datos experimentales, es decir, el modelo del error es adecuado para la tracción cíclica de la configuración 1.

5.1.3. Probabilidad de Falla a Tracción

Es de interés conocer la resistencia máxima a tracción del anclaje tanto cíclica como estáticamente, este valor nos indica la capacidad resistente que tienen los anclajes, con lo anterior, se procede a obtener el gráfico de "Probabilidad de Falla vs Resistencia máxima" lo cual se realiza utilizando el método de Monte Carlo detallado en la sección 2.4. En la *figura 5.4a* se tiene en color rojo la probabilidad de falla de la curva ajustada sin considerar el error. En la *figura 5.4b* se tiene en color azul la probabilidad de falla del anclaje considerando el error del ajuste. La metodología empleada para las 8 configuraciones restantes es análoga tanto para el caso estático como el cíclico, se mantiene la notación de colores antes mencionada.

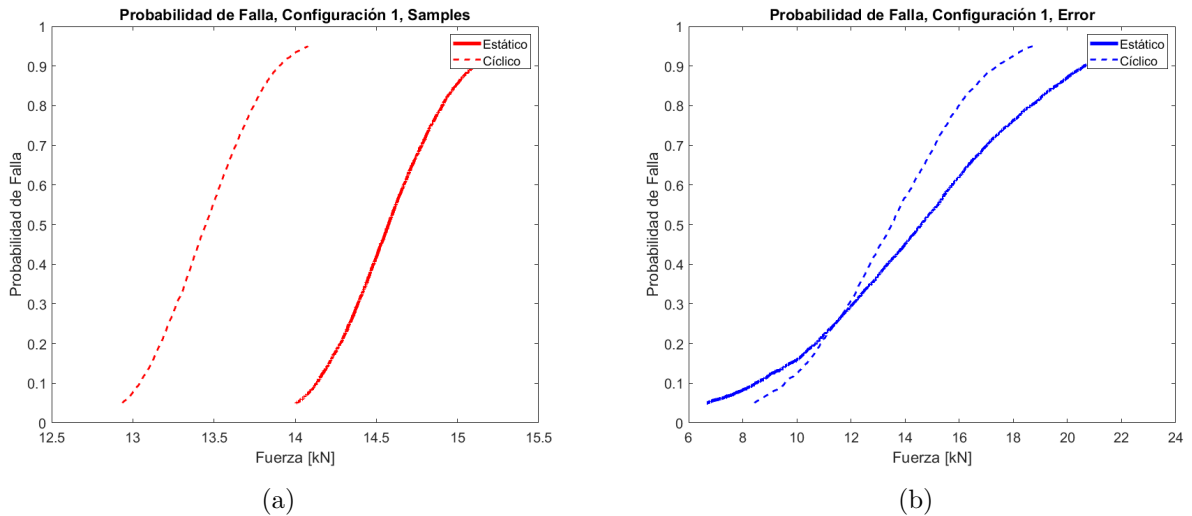


Figura 5.4: Probabilidad de falla a tracción, configuración 1.

Con el gráfico anterior es posible conocer la resistencia máxima que se le puede asignar al anclaje para una determinada confiabilidad. En la *figura 5.4.a* se observa que la curva de probabilidad de falla ajustada (sin considerar el error) para el caso estático es mayor que para el caso cíclico, lo anterior es consistente con los datos experimentales. Por otro lado, al considerar el error (*figura 5.4.b*), se observa que la probabilidad de falla en el caso cíclico es menor, excepto para valores de probabilidad de falla menores a 0.2.

5.2. Configuración 2

5.2.1. Curva Ajustada Tracción Estático

En la *figura 5.5* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción estática de la configuración 2 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de arcilla perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

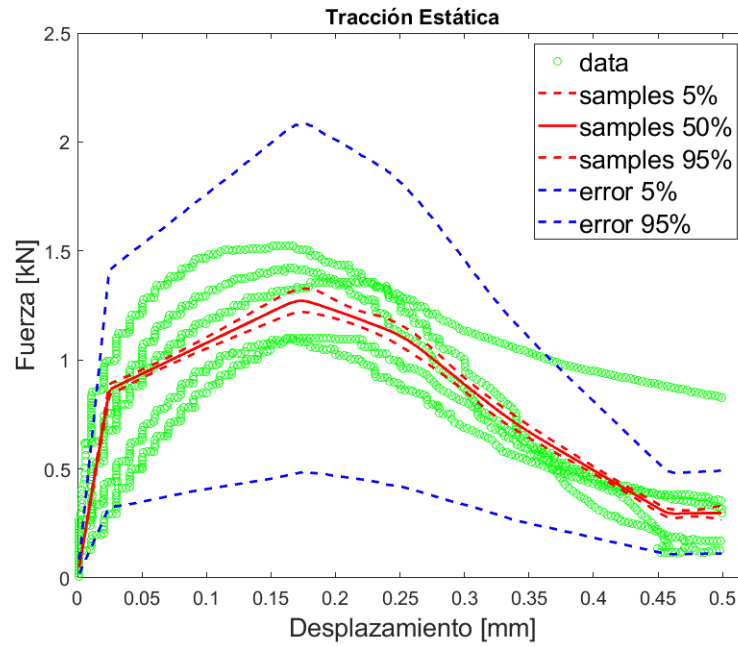


Figura 5.5: Curva ajustada configuración 2, tracción estático.

En la *figura 5.5* se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que el modelo utilizado no presenta un comportamiento adecuado, donde en la zona central del gráfico existe una gran dispersión.

5.2.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico

En la *figura 5.6* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción cíclica de la configuración 2 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de arcilla perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

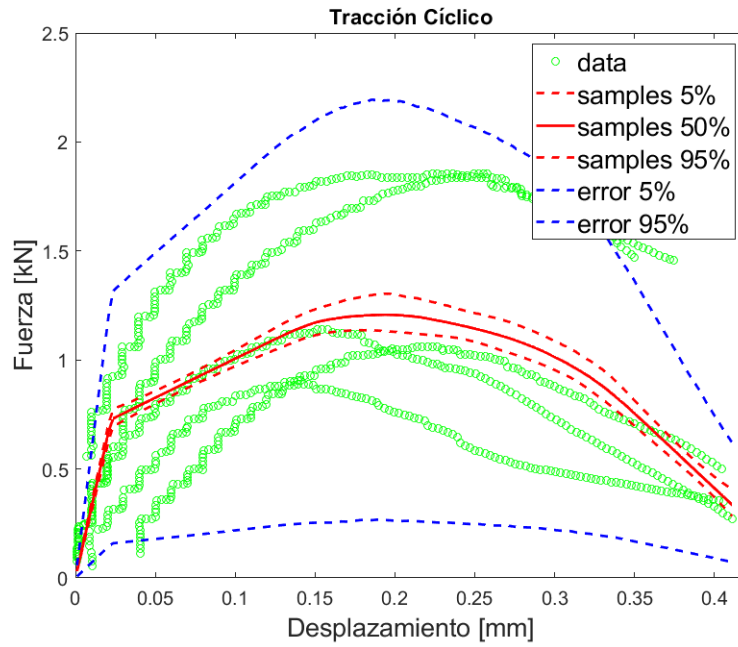


Figura 5.6: Curva ajustada configuración 2, tracción cíclico.

En la *figura 5.6* se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que la curva inferior presenta una gran dispersión de los datos experimentales.

5.2.3. Probabilidad de Falla a Tracción

En *figura 5.7* se presenta el gráfico de “Probabilidad de Falla vs Resistencia” máxima para los ensayos de tracción de la configuración 2 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de arcilla perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

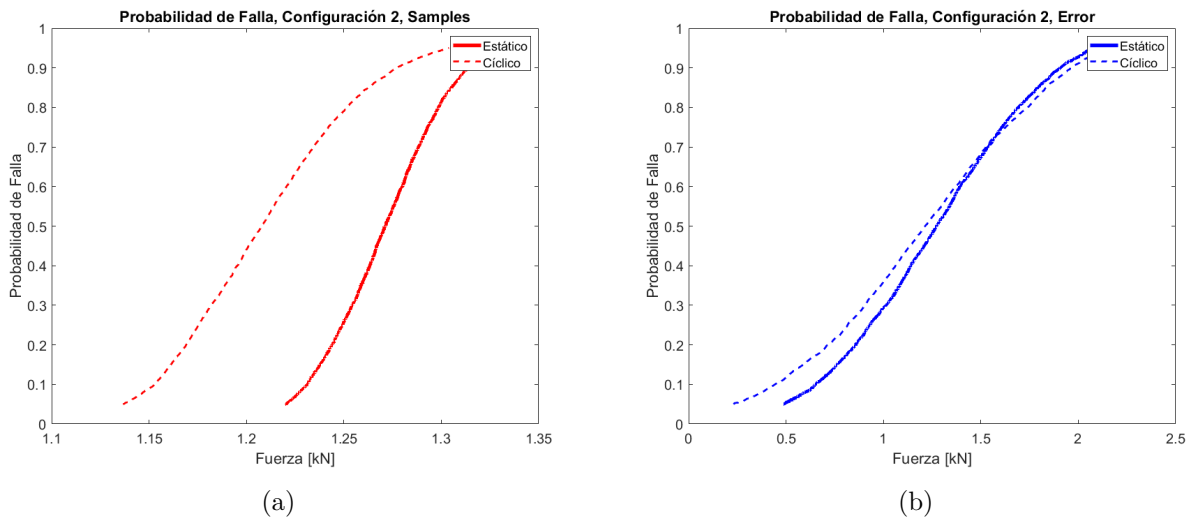


Figura 5.7: Probabilidad de falla a tracción, configuración 2.

En la *figura 5.7.a* se observa que la curva de probabilidad de falla ajustada para el caso estático es mayor que para el caso cíclico, cuando la probabilidad de falla es cercana al 90 % la resistencia máxima estática y cíclica es prácticamente la misma. Por otro lado, al considerar el error (*figura 5.4.b*), se observa que la probabilidad de falla en ambos casos (cíclico y estático) es prácticamente la misma a lo largo de toda la curva.

5.3. Configuración 3

5.3.1. Curva Ajustada Tracción Estático

En la *figura 5.8* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción estática de la configuración 3 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de arcilla perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

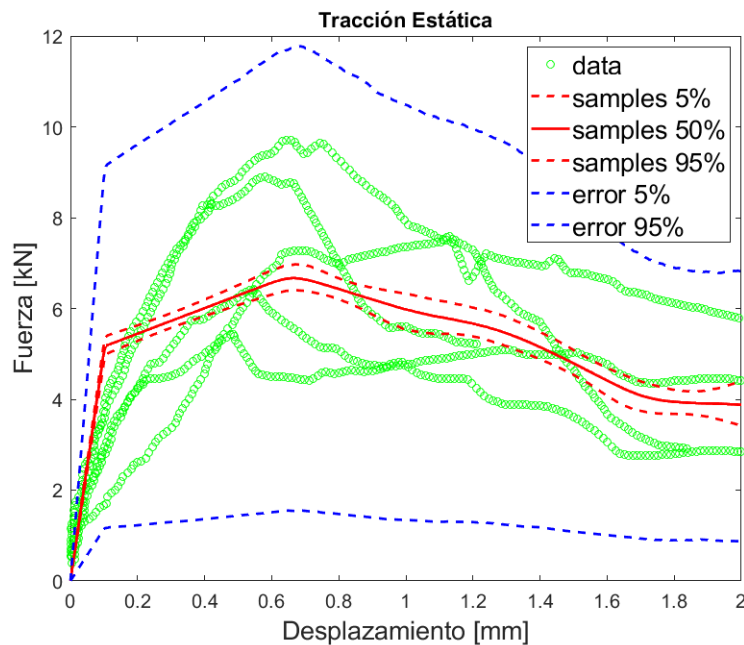


Figura 5.8: Curva ajustada configuración 3, tracción estático.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que la curva inferior presenta una gran dispersión de los datos experimentales.

5.3.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico

En la *figura 5.9* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción cíclico de la configuración 3 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de arcilla perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

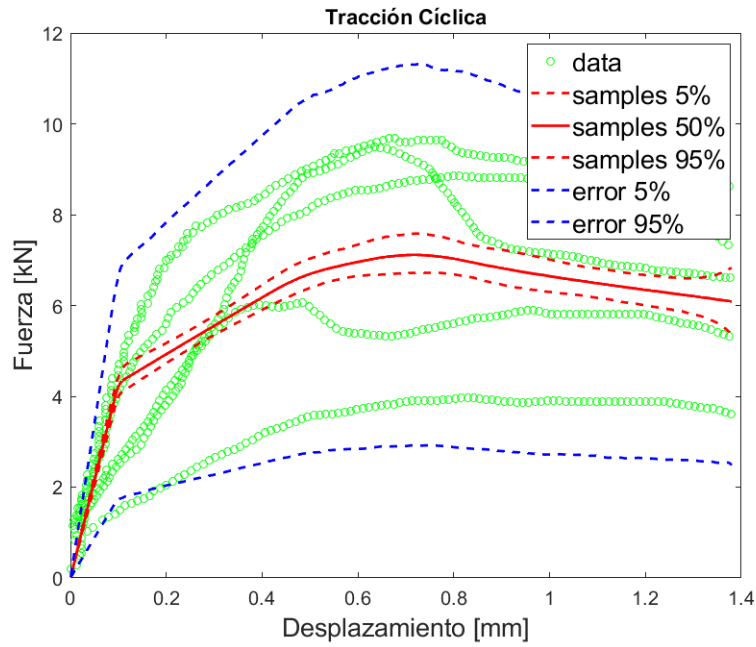


Figura 5.9: Curva ajustada configuración 3, tracción cíclica.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que existe poca dispersión respecto a los datos experimentales, es decir, el modelo del error es adecuado para la tracción cíclica de la configuración 3.

5.3.3. Probabilidad de Falla a Tracción

En *figura 5.10* se presenta el gráfico de “Probabilidad de Falla vs Resistencia” máxima para los ensayos de tracción de la configuración 3 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de arcilla perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

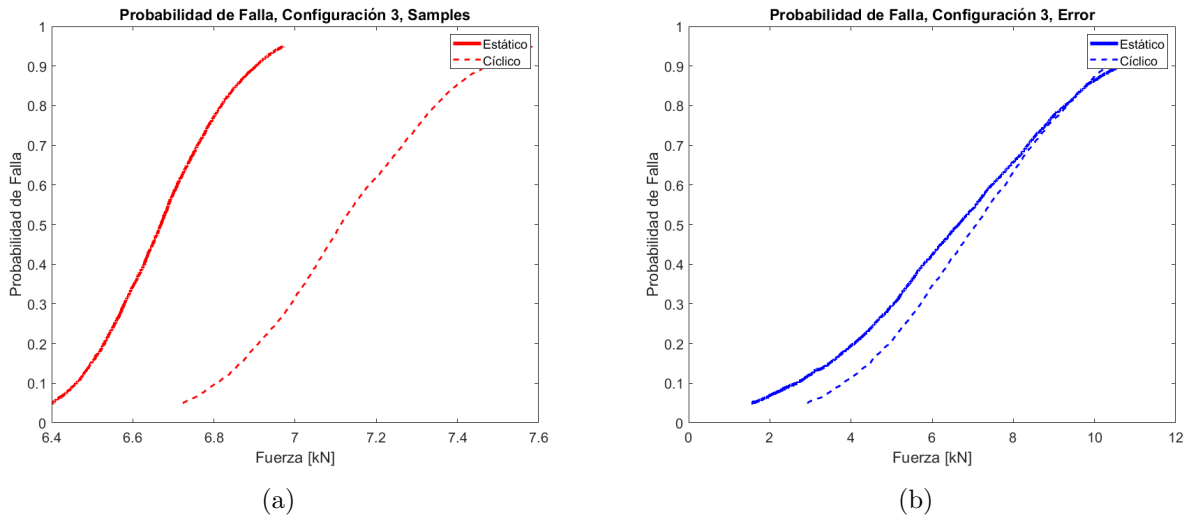


Figura 5.10: Probabilidad de falla a tracción, configuración 3.

En la *figura 5.10.a* se observa que la curva de probabilidad de falla ajustada para el caso cíclico es mayor que para el caso estático, lo anterior es consistente con lo que se observa en los datos experimentales. Por otro lado, al considerar el error (*figura 5.10.b*), se observa que la probabilidad de falla en ambos casos (cíclico y estático) es bastante similar.

5.4. Configuración 4

5.4.1. Curva Ajustada Tracción Estático

En la *figura 5.11* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción estática de la configuración 4 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de arcilla perforado horizontalmente (ver *figura 3.2*).

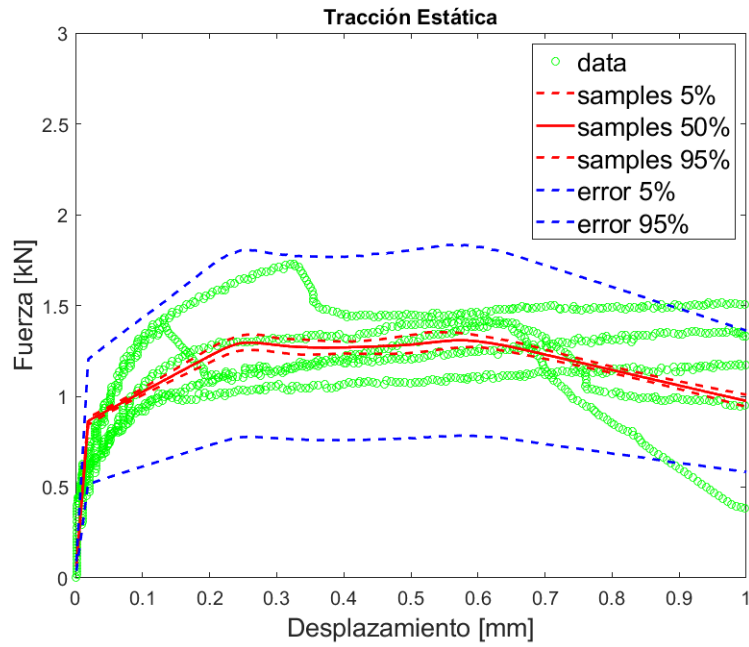


Figura 5.11: Curva ajustada configuración 4, tracción estático.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que existe poca dispersión respecto a los datos experimentales, es decir, el modelo del error es adecuado para la tracción cíclica de la configuración 1.

5.4.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico

En la *figura 5.12* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción cíclica de la configuración 4 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de arcilla perforado horizontalmente (ver *figura 3.2*).

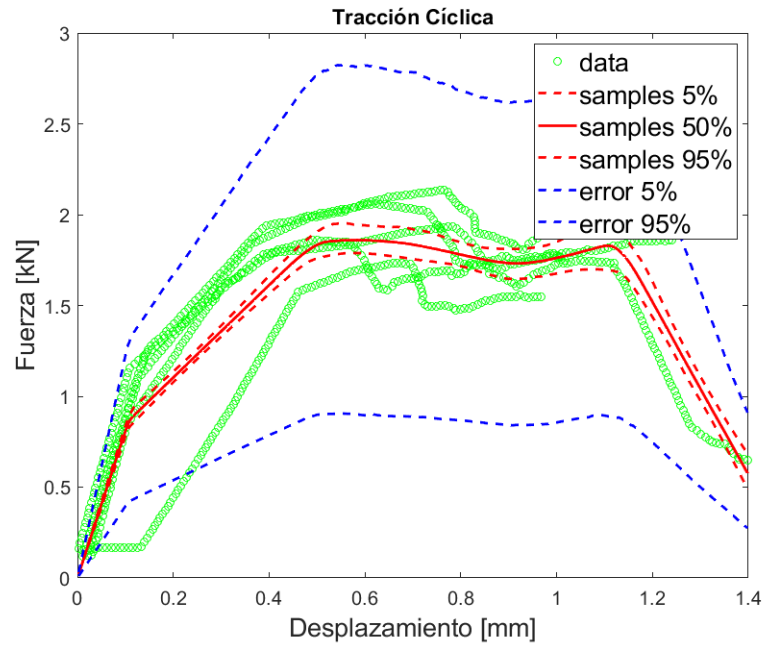


Figura 5.12: Curva ajustada configuración 4, tracción cíclico.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que el modelo utilizado no presenta un comportamiento adecuado, donde en la zona central del gráfico existe una gran dispersión.

5.4.3. Probabilidad de Falla a Tracción

En *figura 5.13* se presenta el gráfico de “Probabilidad de Falla vs Resistencia” máxima para los ensayos de tracción de la configuración 4 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de arcilla perforado horizontalmente (ver *figura 3.2*).

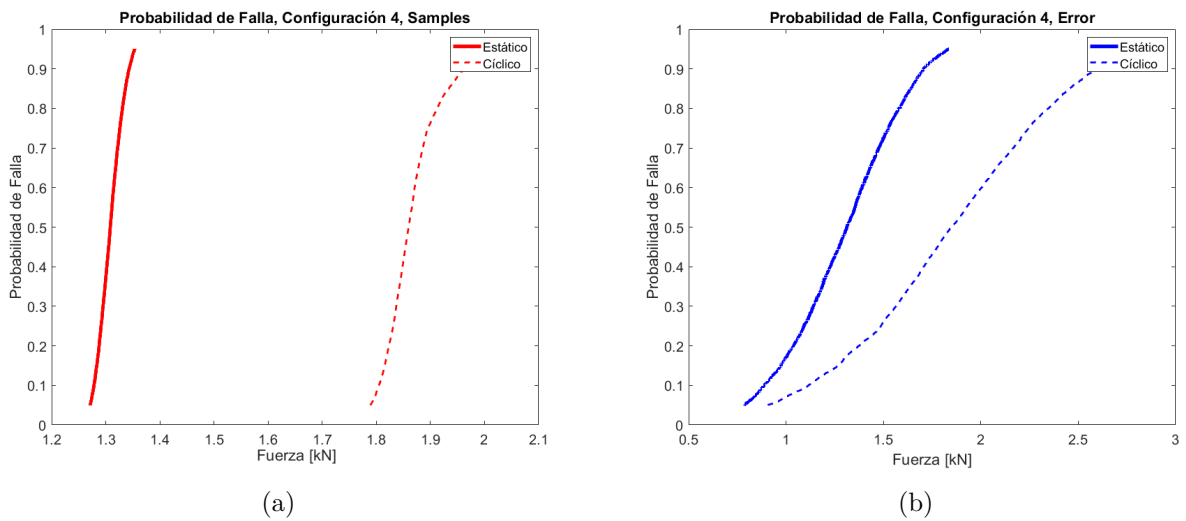


Figura 5.13: Probabilidad de falla a tracción, configuración 4.

En la *figura 5.13.a* se observa que la curva de probabilidad de falla ajustada para el caso cíclico es mayor que para el caso estático, lo anterior es consistente con lo que se observa en los datos experimentales. Por otro lado, al considerar el error (*figura 5.13.b*), se observa que la probabilidad de falla en los casos cíclico y estático es similar para probabilidades de falla bajas, sin embargo, para probabilidades de falla altas la resistencia cíclica máxima es mayor.

5.5. Configuración 5

5.5.1. Curva Ajustada Tracción Estático

En la *figura 5.14* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción estática de la configuración 5 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de arcilla perforado horizontalmente (ver *figura 3.2*).

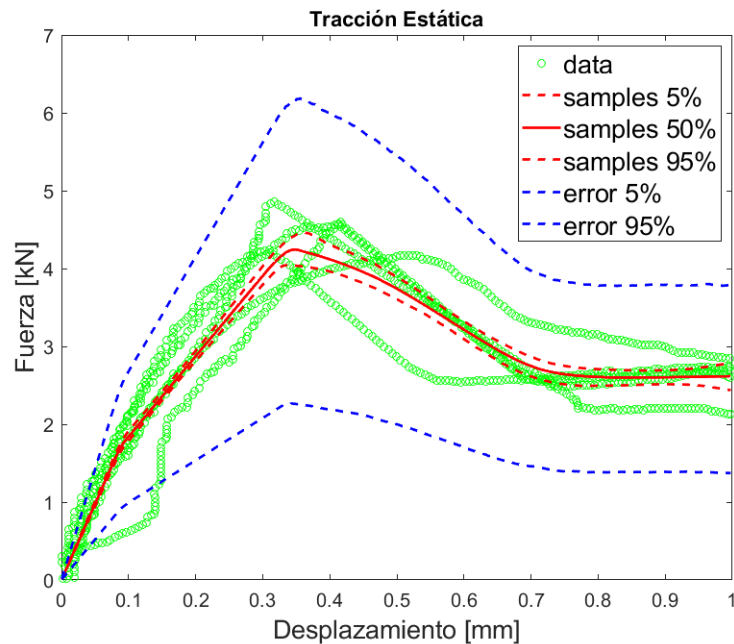


Figura 5.14: Curva ajustada configuración 5, tracción estático.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que existe poca dispersión respecto a los datos experimentales, es decir, el modelo del error es adecuado para la tracción estática de la configuración 5.

5.5.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico

En la *figura 5.15* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción cíclica de la configuración 5 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de arcilla perforado horizontalmente (ver *figura 3.2*).

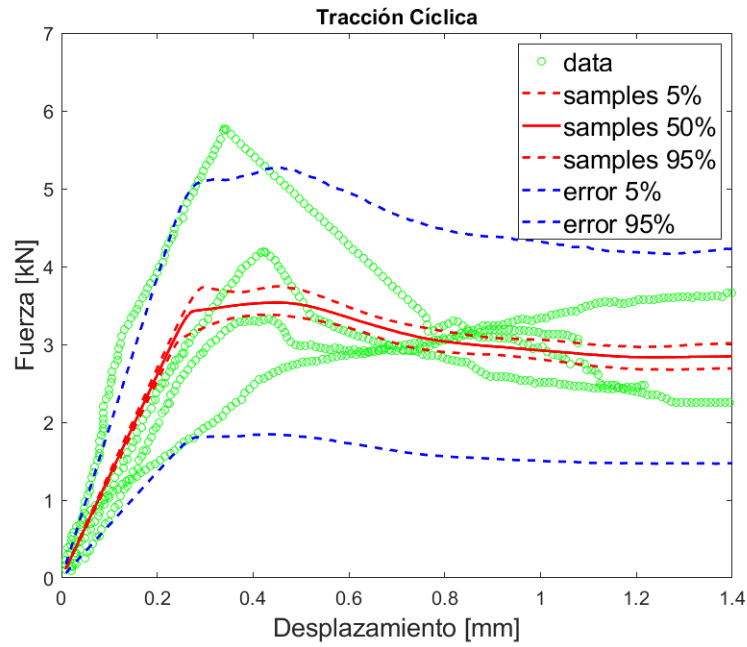
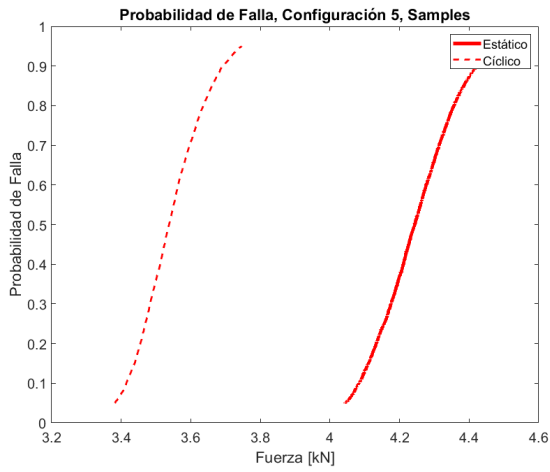


Figura 5.15: Curva ajustada configuración 5, tracción cíclico.

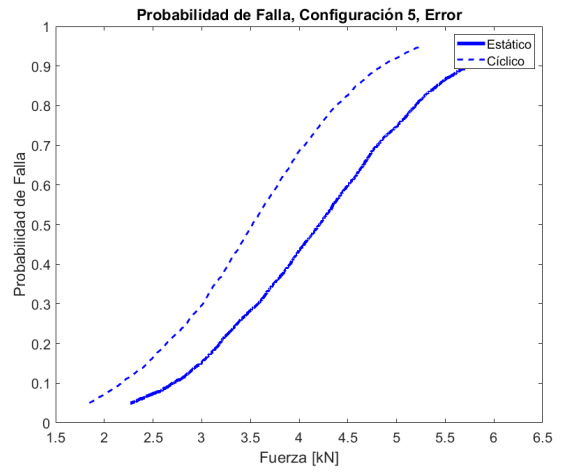
Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que existe poca dispersión respecto a los datos experimentales, es decir, el modelo del error es adecuado para la tracción cíclica de la configuración 5.

5.5.3. Probabilidad de Falla a Tracción

En *figura 5.16* se presenta el gráfico de “Probabilidad de Falla vs Resistencia” máxima para los ensayos de tracción de la configuración 5 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de arcilla perforado horizontalmente (ver *figura 3.2*).



(a)



(b)

Figura 5.16: Probabilidad de falla a tracción, configuración 5.

En la *figura 5.16.a* se observa que la curva de probabilidad de falla ajustada para el caso estático es mayor que para el caso cíclico. Lo anterior no es del todo consistente con lo que se observa en los datos experimentales y puede deberse a la baja dispersión existente en los ensayos de tracción estática y a la alta dispersión presente en los ensayos de tracción cíclica. Por otro lado, al considerar el error (*figura 5.16.b*), se observa que la probabilidad de falla en los casos cíclico y estático es similar, donde la resistencia estática es levemente mayor.

5.6. Configuración 6

5.6.1. Curva Ajustada Tracción Estático

En la *figura 5.17* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción estática de la configuración 6 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de hormigón perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

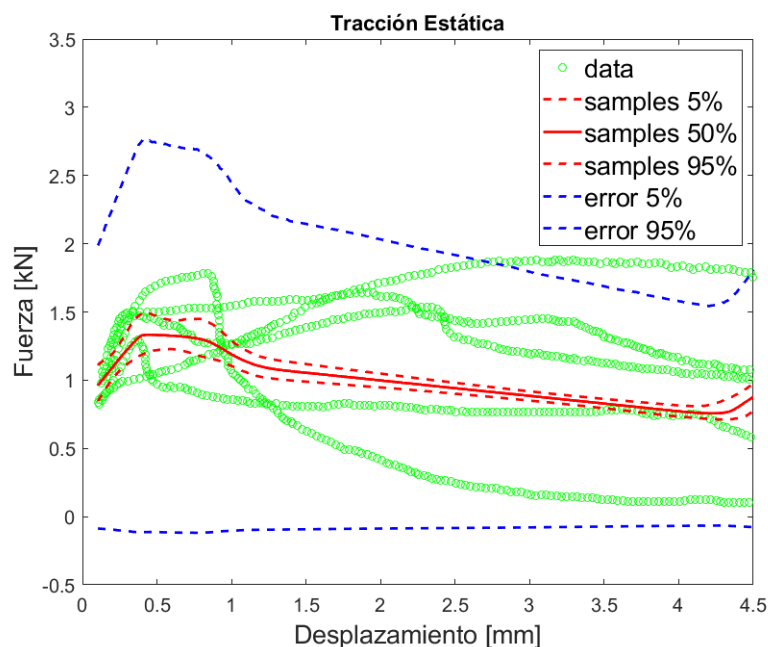


Figura 5.17: Curva ajustada configuración 6, tracción estático.

En primer lugar, se observa que las curvas experimentales no inician en $(0,0)$, esto se debe principalmente a la digitalización de los datos experimentales donde las curvas presentaban una pendiente extremadamente inclinada en su inicio (ver detalle de digitalización en Anexo A.6.1), de todos modos, la ausencia de esta información no es relevante debido a que los valores de mayor interés se tienen cuando la fuerza es máxima.

En segundo lugar, se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que el modelo utilizado no presenta un comportamiento adecuado producto de su alta dispersión, además, se alcanzan valores negativos lo cual no tiene sentido físico.

5.6.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico

En la *figura 5.18* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción cíclica de la configuración 6 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de hormigón perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

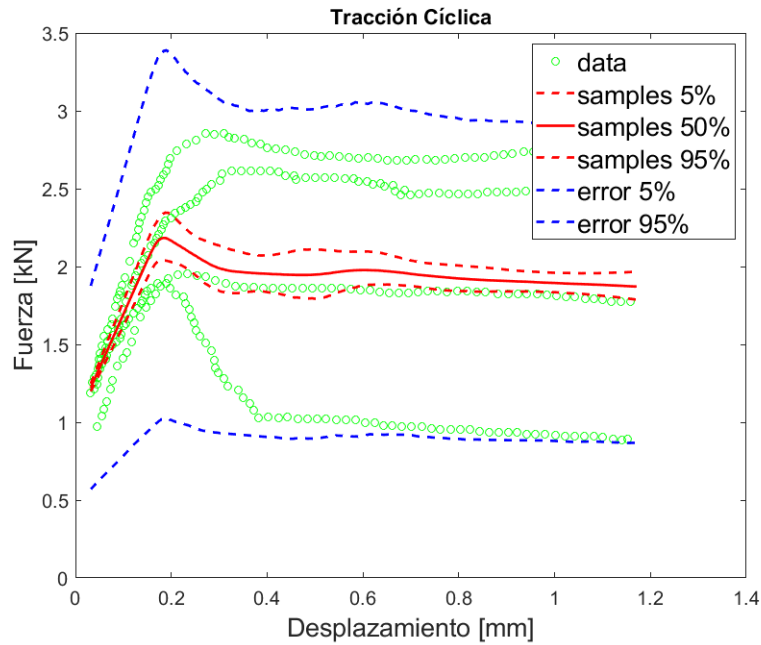


Figura 5.18: Curva ajustada configuración 6, tracción cíclico.

En primer lugar, se observa que las curvas experimentales no inician en $(0,0)$, esto se debe principalmente a la digitalización de los datos experimentales donde las curvas presentaban una pendiente extremadamente inclinada en su inicio (ver detalle de digitalización en Anexo A.6.2), de todos modos, la ausencia de esta información no es relevante debido a que los valores de mayor interés se tienen cuando la fuerza es máxima.

En segundo lugar, se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que el modelo utilizado presenta un comportamiento adecuado teniendo una muy baja dispersión.

5.6.3. Probabilidad de Falla a Tracción

En *figura 5.19* se presenta el gráfico de “Probabilidad de Falla vs Resistencia” máxima para los ensayos de tracción de la configuración 6 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de hormigón perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

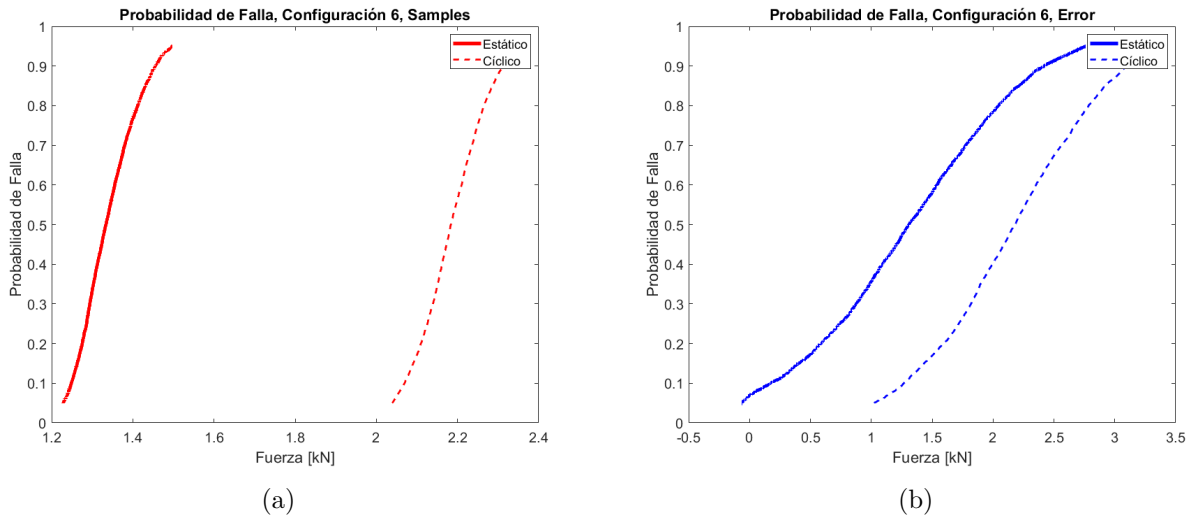


Figura 5.19: Probabilidad de falla a tracción, configuración 6.

En la *figura 5.19.a* se observa que la curva de probabilidad de falla ajustada para el caso cíclico es mayor que para el caso estático, lo anterior es consistente con lo que se observa en los datos experimentales. Al considerar el error (*figura 5.19.b*), se observa que la resistencia máxima en el caso cíclico es mayor que en el estático, para una alta probabilidad de falla, este valor es prácticamente el mismo. Para una probabilidad de falla baja se obtienen valores menores a cero, esto no tiene sentido físico y se debe al comportamiento inadecuado del error en el caso estático.

5.7. Configuración 7

5.7.1. Curva Ajustada Tracción Estático

En la *figura 5.20* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción estática de la configuración 7 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de hormigón perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

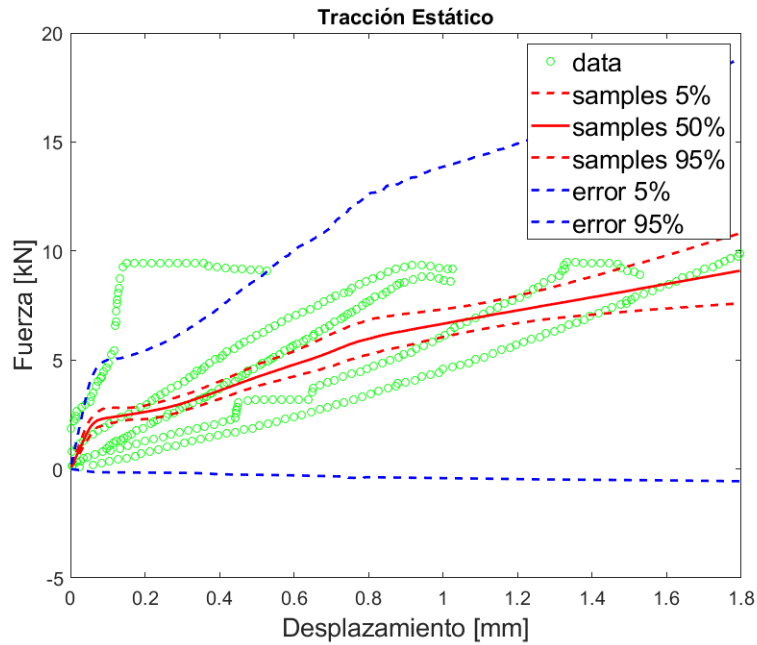


Figura 5.20: Curva ajustada configuración 7, tracción estático.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que el modelo utilizado presenta un comportamiento inadecuado, se tiene una gran dispersión respecto a los datos experimentales donde incluso se alcanzan valores negativos, lo cual carece de sentido físico.

5.7.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico

En la *figura 5.21* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción cíclico de la configuración 7 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de hormigón perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).

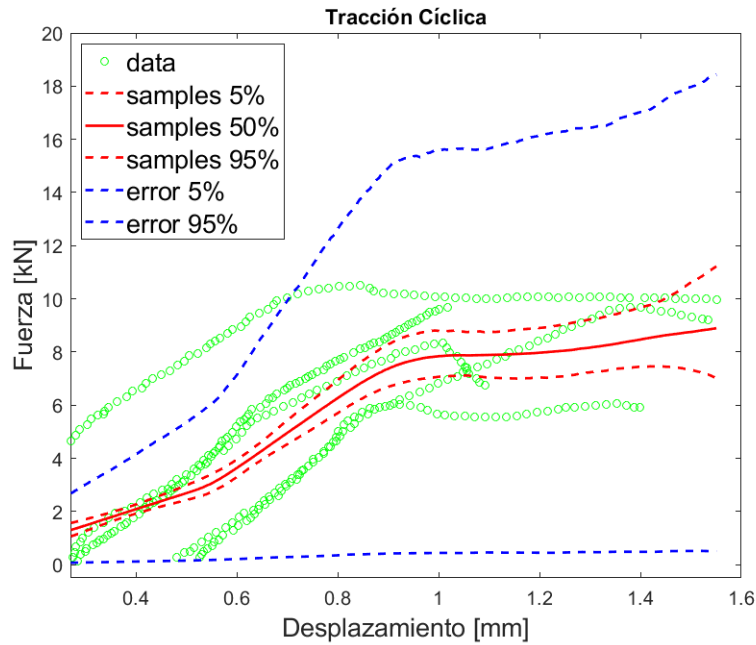


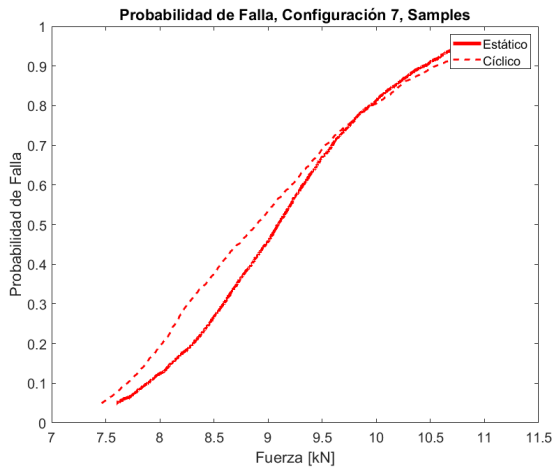
Figura 5.21: Curva ajustada configuración 7, tracción cíclico.

En primer lugar, se observa que no todos los datos experimentales parten en (0,0), algunos ensayos experimentales tienen un desplazamiento asociado cuando no hay ninguna carga actuante, esto tiene poco sentido físico y se puede deber principalmente a un error al momento de registrar los resultados experimentales.

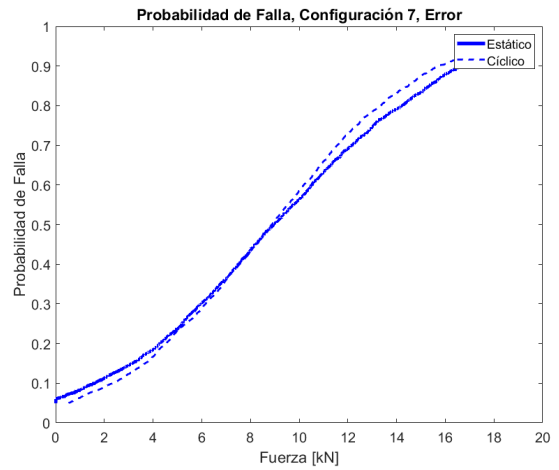
En segundo lugar, se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que el modelo utilizado presenta un comportamiento inadecuado, se tiene una gran dispersión respecto a los datos experimentales donde incluso se alcanzan valores negativos, lo cual carece de sentido físico.

5.7.3. Probabilidad de Falla a Tracción

En *figura 5.22* se presenta el gráfico de “Probabilidad de Falla vs Resistencia” máxima para los ensayos de tracción de la configuración 7 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de hormigón perforado verticalmente (ver *figura 3.2*).



(a)



(b)

Figura 5.22: Probabilidad de falla a tracción, configuración 7.

En la *figura 5.22.a* se observa que las curvas de probabilidad de falla ajustadas son prácticamente iguales, lo anterior es consistente con lo que se observa en los datos experimentales. Al considerar el error (*figura 5.22.b*), también se observa que las curvas de probabilidad de falla son similares, para una baja probabilidad de falla se obtienen valores cercanos a cero, esto no tiene sentido físico y se debe al comportamiento inadecuado del error en el caso estático y cíclico.

5.8. Configuración 8

5.8.1. Curva Ajustada Tracción Estático

En la *figura 5.23* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción estática de la configuración 8 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de hormigón sólido (ver *figura 3.2*).

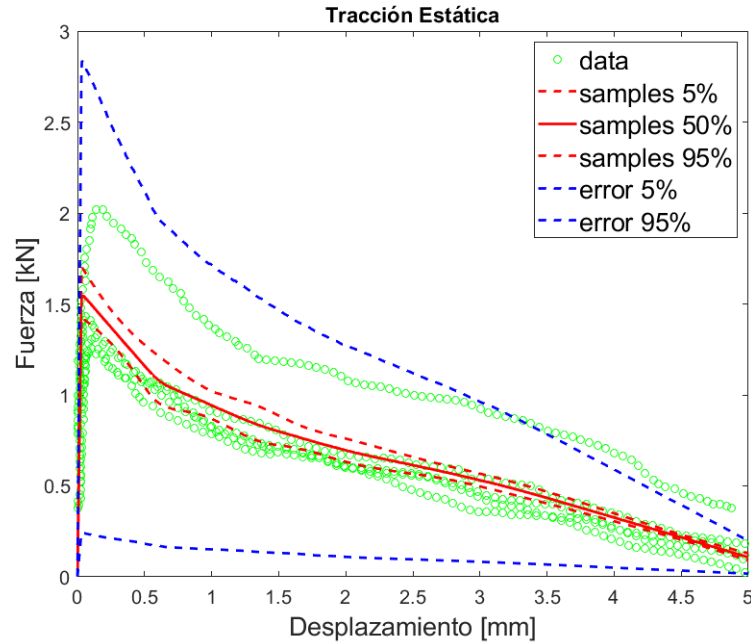


Figura 5.23: Curva ajustada configuración 8, tracción estático.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que el modelo utilizado presenta un comportamiento inadecuado, se tiene una gran dispersión respecto a los datos experimentales lo cual puede ocurrir principalmente por la abrupta pendiente inicial de los datos experimentales.

5.8.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico

En la *figura 5.24* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción cíclico de la configuración 8 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de hormigón sólido (ver *figura 3.2*).

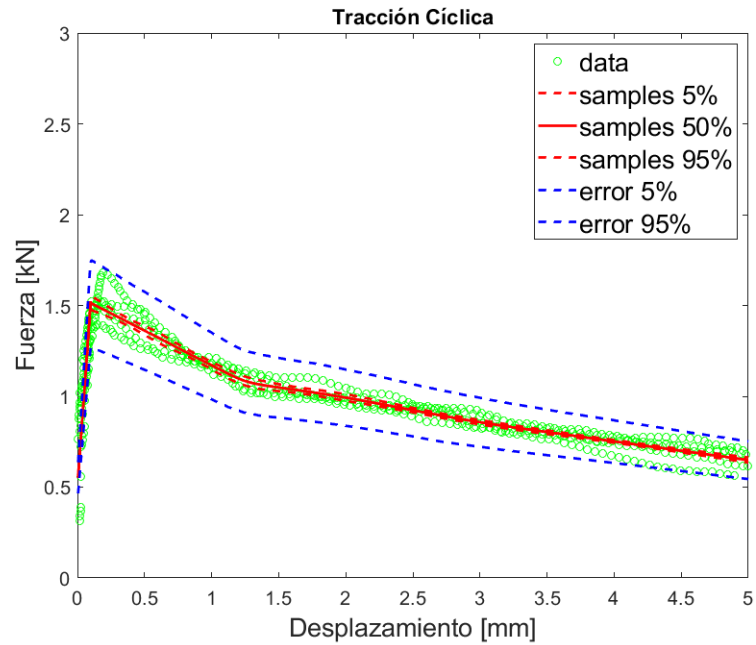


Figura 5.24: Curva ajustada configuración 8, tracción cíclico.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que el modelo utilizado presenta un comportamiento adecuado, la dispersión respecto a los datos experimentales es prácticamente nula.

5.8.3. Probabilidad de Falla a Tracción

En *figura 5.25* se presenta el gráfico de “Probabilidad de Falla vs Resistencia” máxima para los ensayos de tracción de la configuración 8 correspondiente a un anclaje mecánico con un ladrillo de hormigón sólido (ver *figura 3.2*).

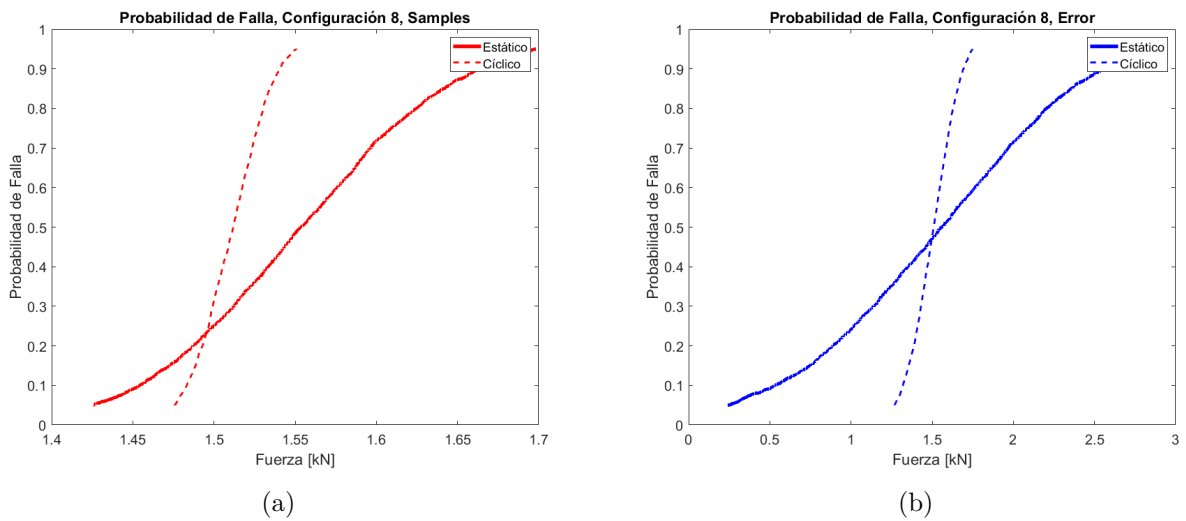


Figura 5.25: Probabilidad de falla a tracción, configuración 8.

En la *figura 5.25.a* se observa que para probabilidades de falla bajas la resistencia cíclica es mayor, por otro lado, para probabilidades de falla altas, la resistencia estática es mayor, lo anterior es consistente con los datos experimentales y la intersección entre ambas curvas de puede explicar por la baja dispersión existente en el ensayo de tracción cíclico. Al considerar el error (*figura 5.25.b*), se observa que las curvas de probabilidad de falla llegan a valores cercanos a cero, lo anterior no tiene sentido físico y se debe a la alta dispersión existente en el ajuste del error en el ensayo de tracción estática.

5.9. Configuración 9

5.9.1. Curva Ajustada Tracción Estático

En la *figura 5.25* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción estática de la configuración 9 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de hormigón sólido (ver *figura 3.2*).

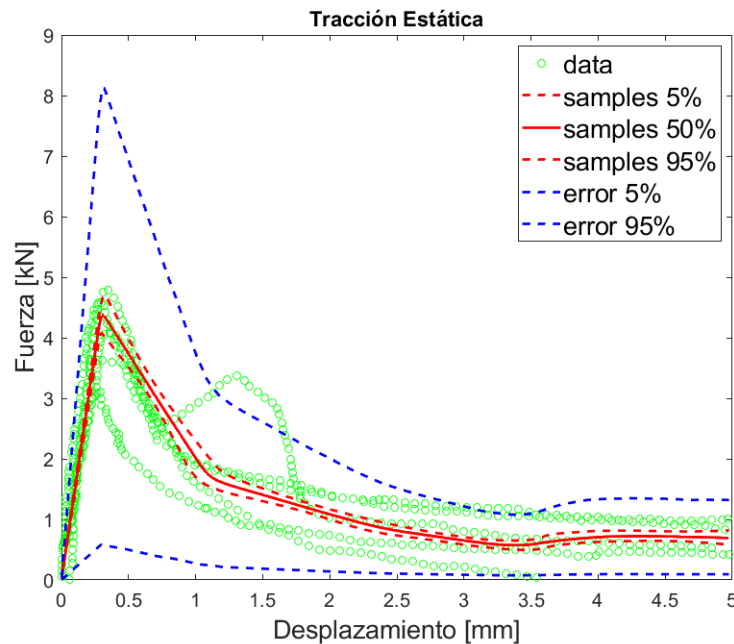


Figura 5.26: Curva ajustada configuración 9, tracción estático.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que el modelo utilizado presenta un comportamiento inadecuado, se tiene una gran dispersión respecto a los datos experimentales lo cual puede ocurrir principalmente por la abrupta pendiente inicial de los ensayos.

5.9.2. Curva Ajustada Tracción Cíclico

En la *figura 5.26* se presenta el ajuste realizado para el ensayo de tracción cíclico de la configuración 9 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de hormigón sólido (ver

figura 3.2).

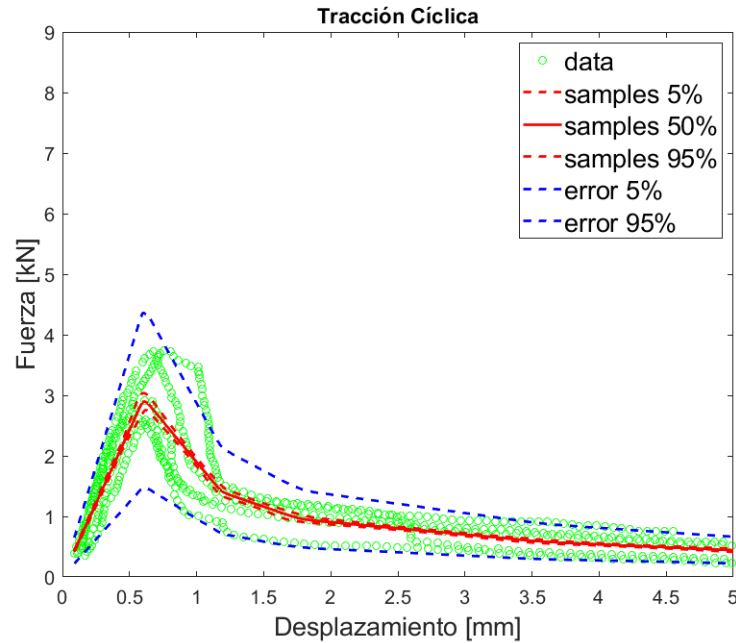


Figura 5.27: Curva ajustada configuración 9, tracción cíclico.

Se observa que las curvas rojas siguen la tendencia central de los datos. Respecto a las curvas azules asociadas al error, se observa que el modelo utilizado presenta un comportamiento adecuado, la dispersión respecto a los datos experimentales es prácticamente nula.

5.9.3. Probabilidad de Falla a Tracción

En *figura 5.28* se presenta el gráfico de “Probabilidad de Falla vs Resistencia” máxima para los ensayos de tracción de la configuración 9 correspondiente a un anclaje químico con un ladrillo de hormigón sólido (ver *figura 3.2*).

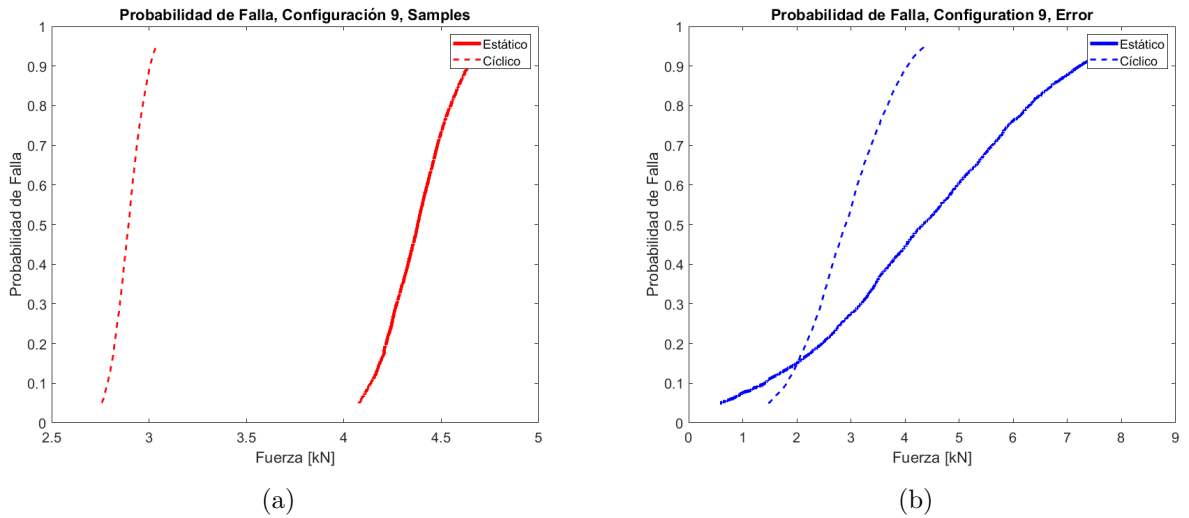


Figura 5.28: Probabilidad de falla a tracción, configuración 3.

En la *figura 5.28.a* se observa que la resistencia estática es mayor, lo anterior es consistente con los datos experimentales. Al considerar el error (*figura 5.28.b*), se observa que las curvas de probabilidad de falla llegan a valores cercanos a cero, lo anterior no tiene sentido físico y se debe a la alta dispersión existente en el ajuste del error en el ensayo de tracción estática.

Capítulo 6

Propuesta Factores de Seguridad

A partir de las curvas de probabilidad de falla obtenidas en el capítulo 5, es posible realizar una comparación entre la resistencia estática y cíclica para cada una de las configuraciones. Lo que se busca es encontrar un factor de seguridad (FS) que permita un diseño seguro ante cargas cíclicas a partir de conocer la resistencia estática máxima. El factor de seguridad propuesto debe ser de manera tal que se cumpla:

$$R_{cíclica} = \frac{R_{estática}}{FS} \quad (6.1)$$

Finalmente el factor de seguridad viene dado por:

$$FS = \frac{R_{estática}}{R_{cíclica}} \quad (6.2)$$

6.1. Factor de seguridad a partir de probabilidad de falla.

En primer lugar, se genera un gráfico “Factor de Seguridad vs Probabilidad de falla” a partir de la división de las curvas de probabilidad de falla estáticas y cíclicas obtenidas en el capítulo anterior. El procedimiento se realiza para las 9 configuraciones y el resultado se presenta a continuación:

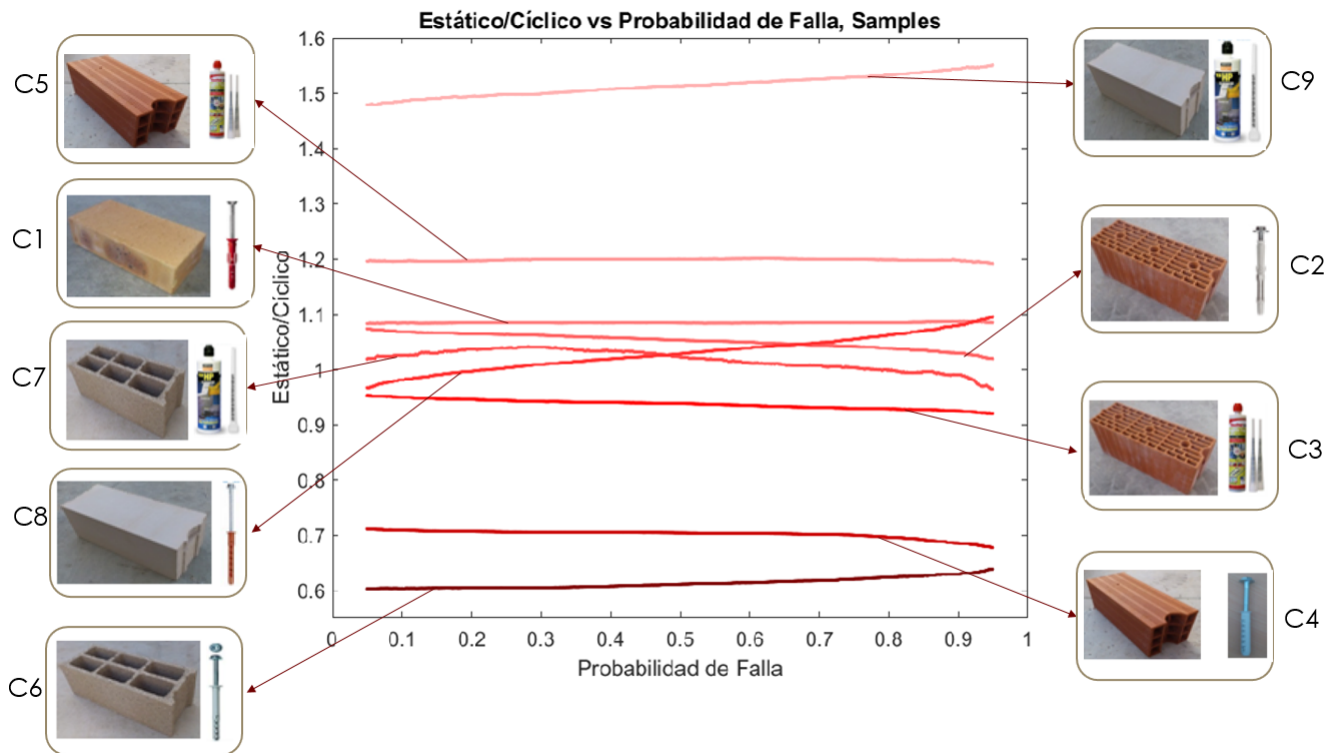


Figura 6.1: Factor de Seguridad vs Probabilidad de falla, todas las configuraciones.

En la *figura 6.1* se observa que la razón (Resistencia Estática)/(Resistencia Cíclica) no presenta una dependencia clara de la probabilidad de falla. Gran parte de las curvas siguen una línea prácticamente recta, donde las diferencias son en su mayoría despreciables para la escala en la que se trabaja. Sin embargo, existen excepciones tal como es el caso de la configuración 8, es por esto que, el factor de seguridad a considerar debe ser el máximo posible para estar en el caso conservador. Se observa que las curvas 3, 4 y 5 se encuentran bajo el valor 1, es decir, la resistencia cíclica es mayor que la resistencia estática, por lo tanto, el factor de seguridad se considera conservadoramente como $FS = 1$ en estos casos.

6.2. Comparación Factores de Seguridad de Anclajes Mecánicos y Químicos.

Se realiza un análisis de las curvas de “Factor de seguridad vs Probabilidad de falla” para cada unidad de albañilería con el fin de identificar una relación entre ellas, de este modo, se podrá realizar una comparación entre anclajes químicos y mecánicos.

A continuación se presentan 4 gráficos de “Factor de seguridad vs Probabilidad de falla” para las distintas unidades de albañilería a excepción de la albañilería de arcilla sólida de la cual solo se cuenta con datos experimentales con anclajes mecánicos y no con anclajes químicos.

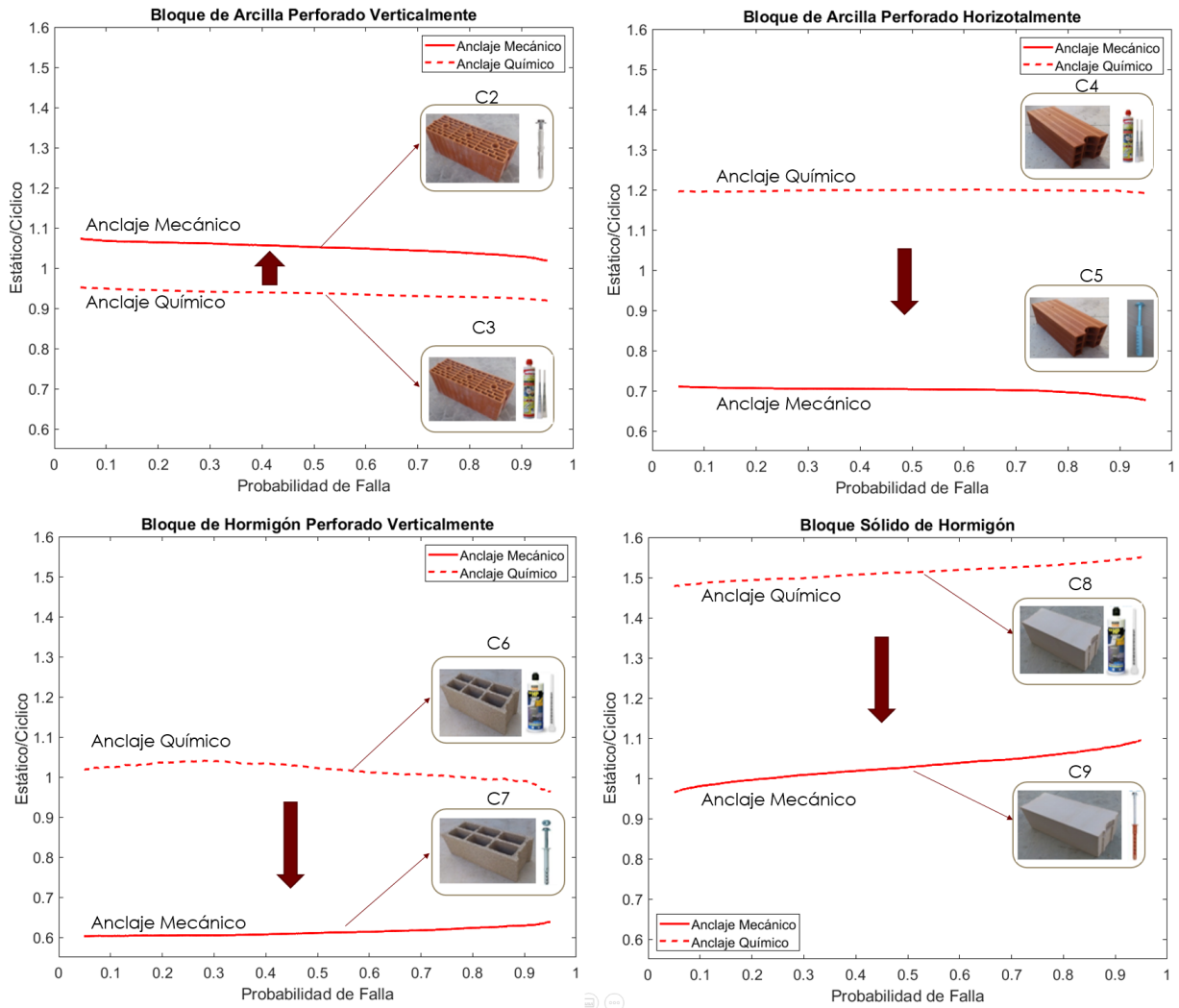


Figura 6.2: Factor de Seguridad vs Probabilidad de falla, comparación anclaje mecánico y químico.

Se observa que en un 75 % de los casos analizados, el factor de seguridad para anclajes químicos es mayor que para los anclajes mecánicos, si bien el universo de unidades de albañilería analizadas es bajo, se puede inferir que los anclajes mecánicos se ven menos perjudicados ante cargas cíclicas.

6.3. Factor de Seguridad Propuesto.

Hasta el momento, el factor de seguridad que se a utilizado es el de la *fórmula 6.2* el cual se ha obtenido de la división de resistencias asociadas a una misma probabilidad de falla. Sin embargo, debido a la alta incertidumbre asociada a la resistencia de los anclajes en albañilería, se propone un factor de seguridad conservador donde se considera que la resistencia estática de los anclajes de albañilería es la menor obtenida en el ajuste central de los datos (asociada a una probabilidad de falla del 5 %), mientras que la resistencia cíclica es la mayor

obtenida (asociada a una probabilidad de falla del 95 %), así, el factor de seguridad propuesto viene dado por:

$$FS = \frac{\text{Resistencia Estática (PF = 95\%)}}{\text{Resistencia Cíclica (PF = 5\%)}} \quad (6.3)$$

Para obtener una información detallada de los anclajes, se procede a tabular las resistencias estáticas y cíclicas para probabilidades de falla de un 5 %, 50 % y 95 % junto a sus respectivos factores de seguridad, además, se obtiene adicionalmente el factor de seguridad propuesto en la *ecuación 6.3*.










| Foto | Configuración | Ladrillo | Anclaje | Esfuerzo | Resistencia PF 5% [kN] | Resistencia PF 50% [kN] | Resistencia PF 95% [kN] | FS PF 5% | FS PF 50% | FS PF 95% | FS = R_95%/R_5% |
|---|---------------|-----------------------------------|---------------|-------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------|-----------|-----------------|
|  | 1 | Arcilla sólido | Hilti HRD10 | Tracción Estático | 14.01 | 14.57 | 15.27 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.18 |
| | | | | Tracción Cíclico | 12.94 | 13.45 | 14.08 | | | | |
|  | 2 | Arcilla perforado verticalmente | Spi 8-long | Tracción Estático | 1.22 | 1.27 | 1.33 | 1.07 | 1.05 | 1.02 | 1.17 |
| | | | | Tracción Cíclico | 1.14 | 1.21 | 1.30 | | | | |
|  | 3 | Arcilla perforado verticalmente | Fis HT | Tracción Estático | 6.40 | 6.67 | 6.97 | 0.95 | 0.94 | 0.92 | 1.04 |
| | | | | Tracción Cíclico | 6.72 | 7.11 | 7.58 | | | | |
|  | 4 | Arcilla perforado horizontalmente | Etanco FM10X8 | Tracción Estático | 1.27 | 1.31 | 1.35 | 0.71 | 0.70 | 0.68 | 0.76 |
| | | | | Tracción Cíclico | 1.79 | 1.86 | 2.00 | | | | |
|  | 5 | Arcilla perforado horizontalmente | Fis HT | Tracción Estático | 4.04 | 4.24 | 4.46 | 1.20 | 1.20 | 1.19 | 1.32 |
| | | | | Tracción Cíclico | 3.38 | 3.54 | 3.75 | | | | |
|  | 6 | Hormigón perforado verticalmente | Fischer 8-XR | Tracción Estático | 1.23 | 1.33 | 1.50 | 0.60 | 0.61 | 0.64 | 0.73 |
| | | | | Tracción Cíclico | 2.04 | 2.18 | 2.35 | | | | |
|  | 7 | Hormigón perforado verticalmente | Simpson AT-HP | Tracción Estático | 7.60 | 9.09 | 10.81 | 1.02 | 1.02 | 0.96 | 1.45 |
| | | | | Tracción Cíclico | 7.46 | 8.89 | 11.22 | | | | |
|  | 8 | Hormigón sólido | Wurth 10 | Tracción Estático | 1.43 | 1.55 | 1.70 | 0.97 | 1.03 | 1.09 | 1.15 |
| | | | | Tracción Cíclico | 1.48 | 1.51 | 1.55 | | | | |
|  | 9 | Hormigón sólido | Simpson AT-HP | Tracción Estático | 4.08 | 4.38 | 4.71 | 1.48 | 1.51 | 1.55 | 1.71 |
| | | | | Tracción Cíclico | 2.76 | 2.89 | 3.04 | | | | |

Figura 6.3: Factores de seguridad para cada configuración.

Tal como es esperado, el factor de seguridad propuesto en la *ecuación 6.3* es el más alto y por ende el más conservador, esto se evidencia con mayor claridad en los gráficos de las *figuras 6.4 y 6.5*, donde se agrupan los anclajes mecánicos y químicos respectivamente. Los puntos azules representan el factor de seguridad según la *ecuación 6.3* los cuales son mayores que los puntos naranjos, grises y amarillos que representan a la *ecuación 6.2* con una probabilidad de falla del 95 %, 50 % y 5 % respectivamente.

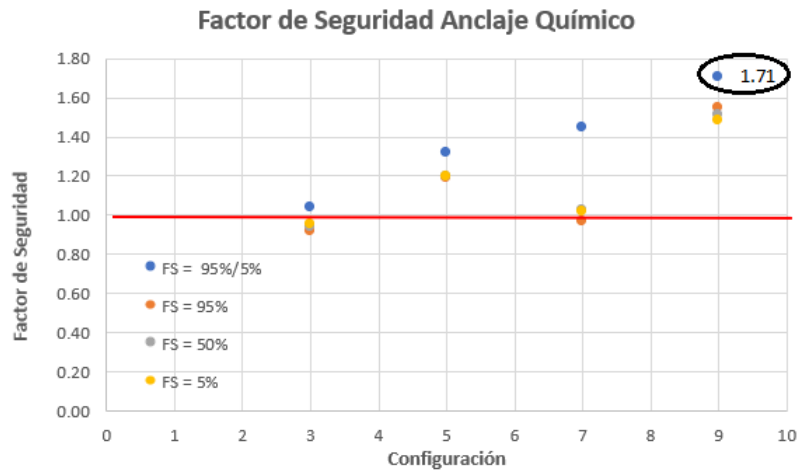


Figura 6.4: Factores de seguridad para anclajes químicos.

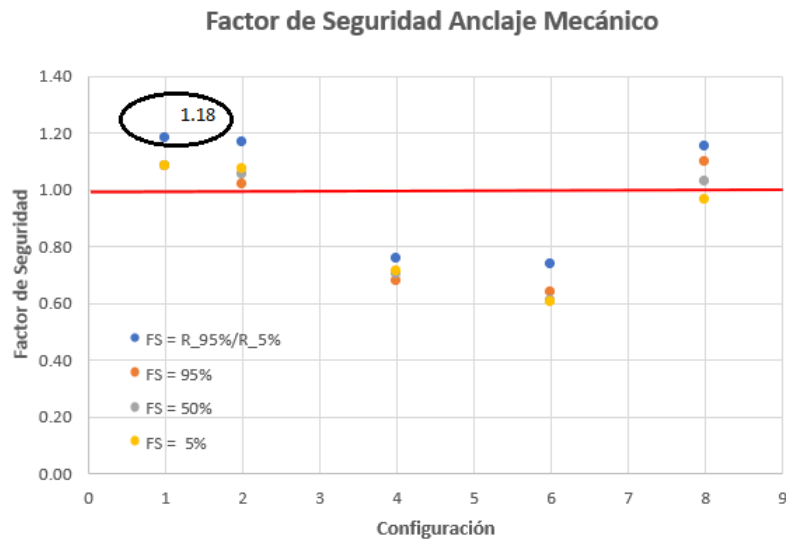


Figura 6.5: Factores de seguridad para anclajes mecánicos.

6.4. Esquema de diseño

Se redondean los valores obtenidos al utilizar la *ecuación 6.3* y se propone un esquema de diseño que considera el tipo de perforación de la unidad de albañilería (horizontal, vertical o sólida) y el tipo de anclaje (mecánico o químico), el cuál se presenta a continuación:

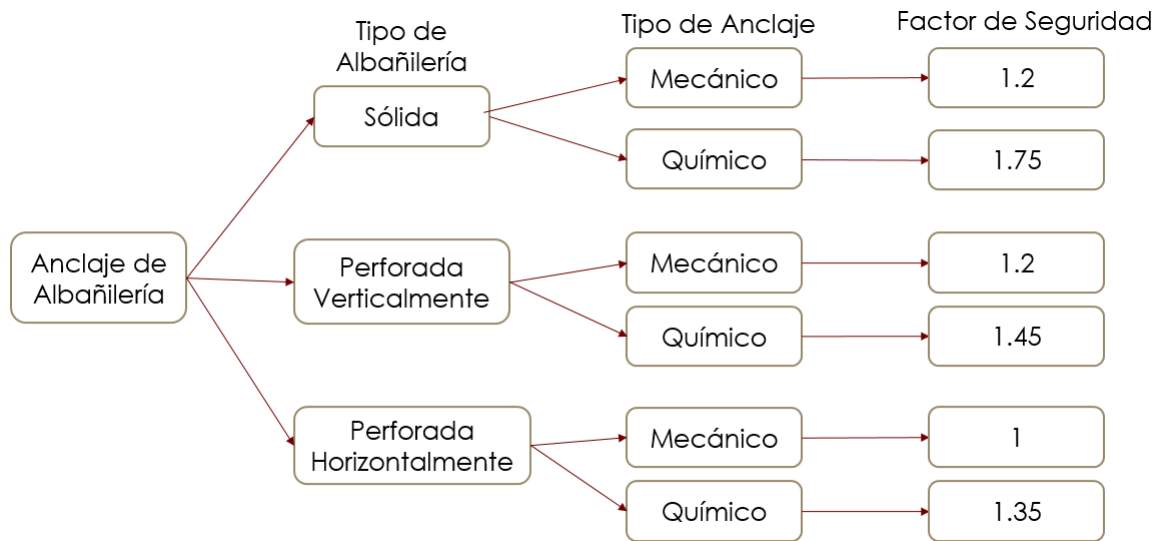


Figura 6.6: Esquema de diseño propuesto.

Además, es interesante tener un esquema de diseño para el caso en que se desconoce el tipo de unidad de albañilería, tal como es el caso de muros empastados.

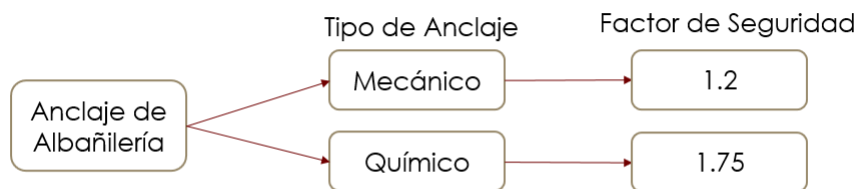


Figura 6.7: Esquema de diseño propuesto.

Finalmente, a modo de realizar una comparación con el estudio realizado anteriormente con los mismos datos [3], se propone un factor de seguridad general para anclajes en albañilería.

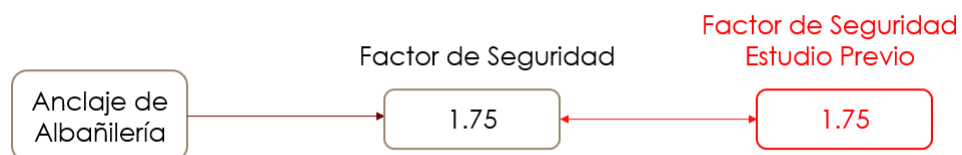


Figura 6.8: Esquema de diseño propuesto.

Se puede observar que el factor de seguridad obtenido coincide con el propuesto en estudios previos.

6.5. Conclusiones

A partir del análisis de resultados realizados en el presente trabajo, se logra establecer una clara metodología para el diseño de anclajes ante cargas cíclicas mediante un factor de seguridad que depende del tipo de albañilería y del tipo de anclaje utilizado. Lo anterior permite establecer una relación entre la resistencia máxima estática y cíclica de los anclajes.

La digitalización de los datos experimentales trae consigo un error de transcripción, sumado a lo anterior, existen datos experimentales que no tienen su origen en 0, esto no tiene sentido físico y es posible que se deba a un registro de datos incorrecto. Una forma de reducir los errores anteriores es teniendo una mayor cantidad de datos experimentales.

Uno de los desafíos a futuro que se plantean en este trabajo, es realizar este mismo análisis con una mayor cantidad de ensayos realizados por cada configuración, de esta manera se reduciría la incertidumbre de los parámetros ajustados debido a que se espera tener una menor dispersión en los datos, también, sería interesante que cada uno de los anclajes mecánicos y químicos utilizados sean ensayados en los distintos tipos de ladrillo que se utilizaron en este trabajo, esto con el fin de poder establecer con mayor claridad si el factor de seguridad propuesto depende mayormente por el tipo de anclaje o por el tipo de ladrillo utilizado.

En el ajuste de curvas realizado en el capítulo 4 se presentaron valores negativos en la estimación del error, esto no es físicamente correcto y ocurre debido a que el modelo utilizado para el error no restringe valores negativos, esto puede ser perfeccionado en trabajos futuros utilizando un modelo de error con una distribución log-normal. Se debe destacar en este punto que si bien el modelo utilizado en la estimación del error no es representativo en todos los casos, esto no trae consigo un error en los factores de seguridad obtenidos debido a que sólo se utilizó la tendencia central de los datos.

Respecto a la diferencia en la resistencia de anclajes químicos y mecánicos, se pudo observar que en un 75% de los casos, el factor de seguridad en anclajes químicos fue mayor respecto a anclajes mecánicos, es decir los anclajes mecánicos se vieron menos perjudicados ante cargas cíclicas.

Bibliografía

- [1] George Welz, Hilti AG, Schaan, Liechtenstein (2017) New Design Approaches for Metal Injection Anchors in Masonry.
- [2] ETAG 029: Guideline for European Technical Approval of Metal Injection Anchors for use in Masonry. EOTA, Brussels: Edition April 2013.
- [3] Fabien Delhomme, Jean-Marc Berg, Yannick Sallaün (2020). Design of anchors in masonry under seismic load.
- [4] Meyer, A.: Zum Tragverhalten von Injektionsdübeln in Mauerwerk. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, 2006 (in German).
- [5] Welz, G.: Tragverhalten und Bemessung von Injektionsdübeln unter Quer- und Schrägzugbelastung im Mauerwerk. Dissertation, Universität Stuttgart 2011 (in German).
- [6] Hofmann, J., Welz, G. (2017). Load-bearing behaviour and characteristic load-bearing capacity of injection anchors in masonry: Tragverhalten und charakteristische Tragfähigkeit von Injektionsdübeln in Mauerwerk. *Mauerwerk*, 21(6), 369-384.
- [7] Meyer, A., Eligehausen, R. (2004). Injection Anchors for use in Masonry Structures. In 13th International Brick and Block Conference (pp. 109-117).
- [8] Giresini, L., Puppio, M. L., Taddei, F. (2020). Experimental pull-out tests and design indications for strength anchors installed in masonry walls. *Materials and Structures*, 53(4), 1-16.
- [9] Beck, J. L., Taflanidis, A. (2013). Prior and posterior robust stochastic predictions for dynamical systems using probability logic. *International Journal for Uncertainty Quantification*, 3(4).
- [10] Peralta, P., Ruiz, R. O., Taflanidis, A. A. (2020). Bayesian identification of electromechanical properties in piezoelectric energy harvesters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 106506.
- [11] Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2013). Norma técnica minvu ntm 001: Diseño sísmico de componentes y sistemas no estructurales.
- [12] Ruiz, R. O., Taflanidis, A. A. (2018). Uncertainty Quantification.

[13] Camacho, C., López, A. M., Arias, M. A. (2006). Regresión lineal simple. de Apuntes no publicados de la asignatura Análisis de datos II de la licenciatura de Psicología, Universidad de Sevilla.

[14] Guiasu, S., Shenitzer, A. (1985). The principle of maximum entropy. The mathematical intelligencer, 7(1), 42-48.

Anexo A

Datos experimentales

En el presente anexo se presentarán los datos experimentales con los que se contó para desarrollar el trabajo de título junto con la digitalización de cada uno de ellos.

A.1. Configuración 1

A.1.1. Ensayo Tracción Estático

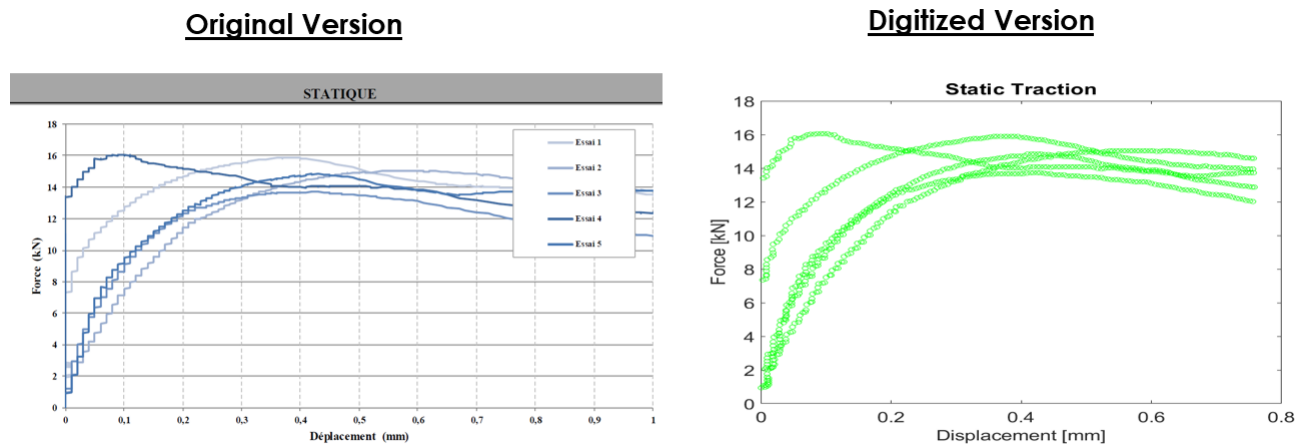


Figura A.1: Configuración 1: ensayo tracción estático.

A.1.2. Ensayo Tracción Cíclico

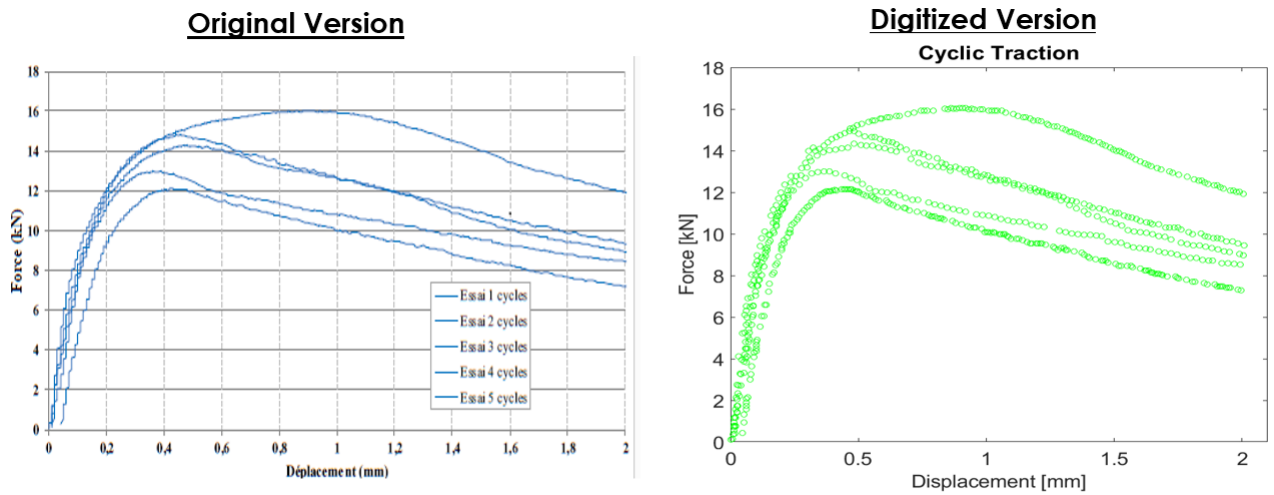


Figura A.2: Configuración 1: ensayo tracción cíclico.

A.2. Configuración 2

A.2.1. Ensayo Tracción Estático

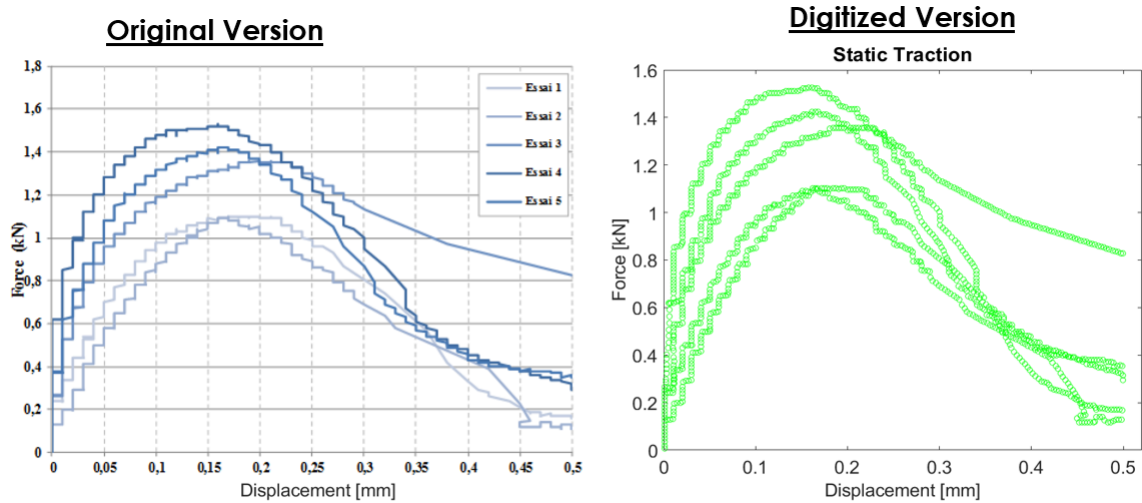


Figura A.3: Configuración 2: ensayo tracción estático.

A.2.2. Ensayo Tracción Cíclico

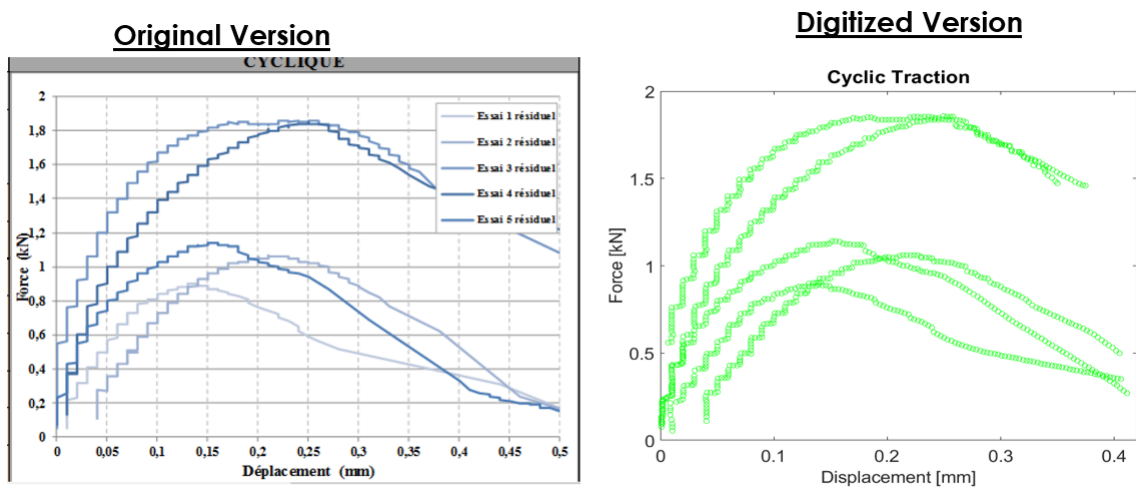


Figura A.4: Configuración 2: ensayo tracción cíclico.

A.3. Configuración 3

A.3.1. Ensayo Tracción Estático

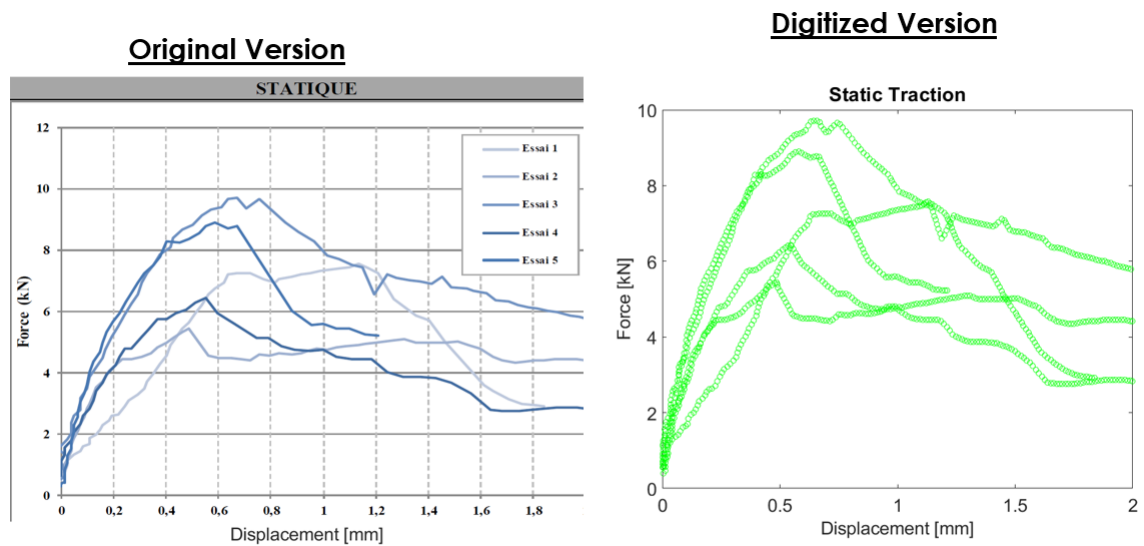


Figura A.5: Configuración 3: ensayo tracción estático.

A.3.2. Ensayo Tracción Cíclico

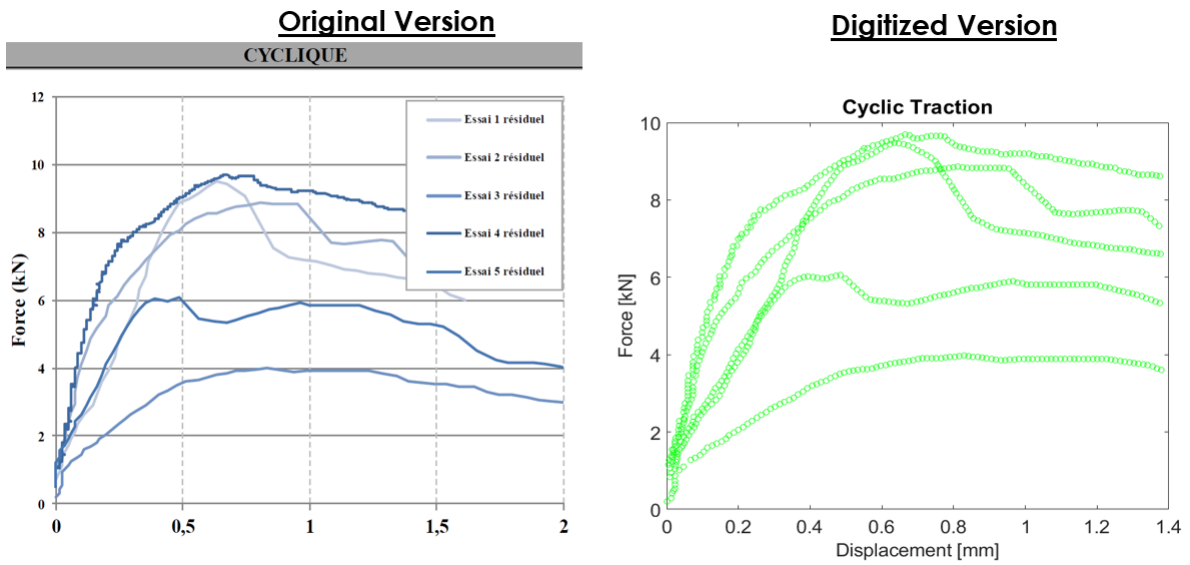


Figura A.6: Configuración 3: ensayo tracción cíclico.

A.4. Configuración 4

A.4.1. Ensayo Tracción Estático

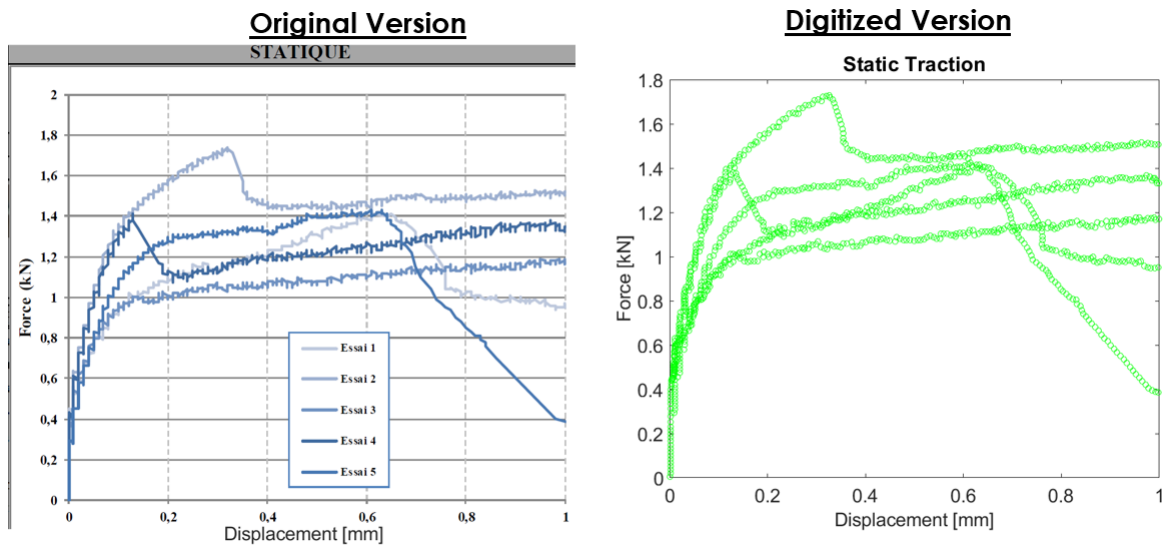


Figura A.7: Configuración 4: ensayo tracción estático.

A.4.2. Ensayo Tracción Cíclico

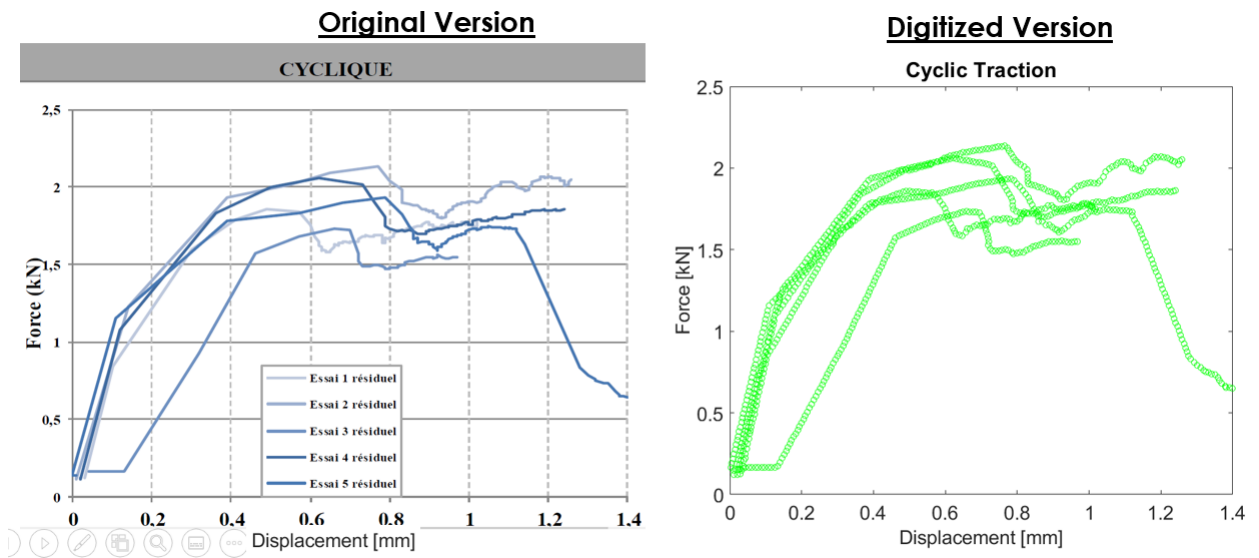


Figura A.8: Configuración 4: ensayo tracción cíclico.

A.5. Configuración 5

A.5.1. Ensayo Tracción Estático

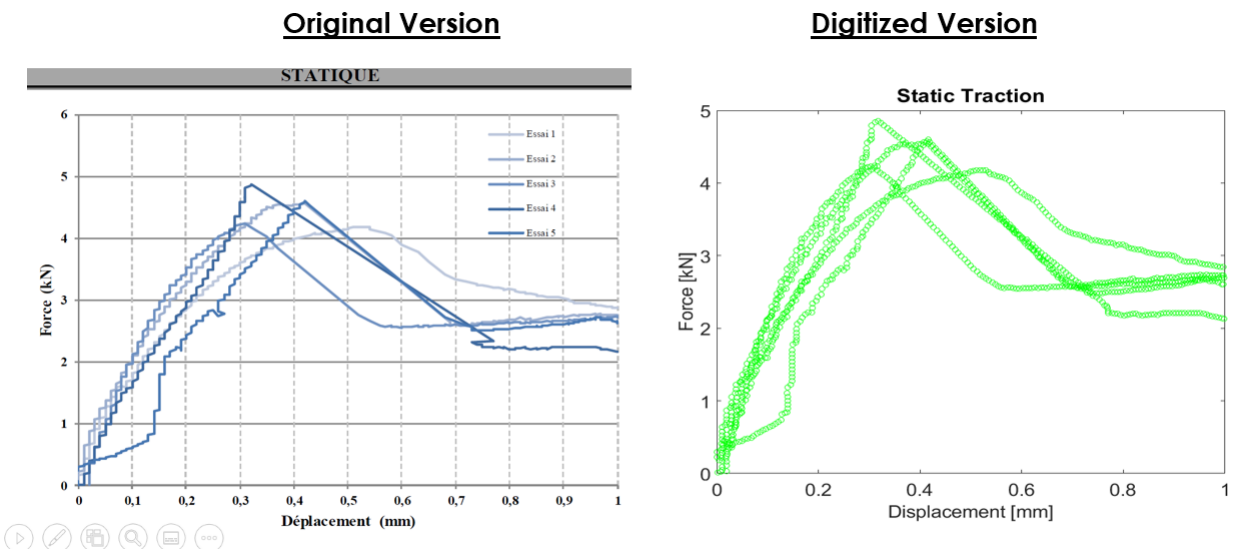


Figura A.9: Configuración 5: ensayo tracción estático.

A.5.2. Ensayo Tracción Cíclico

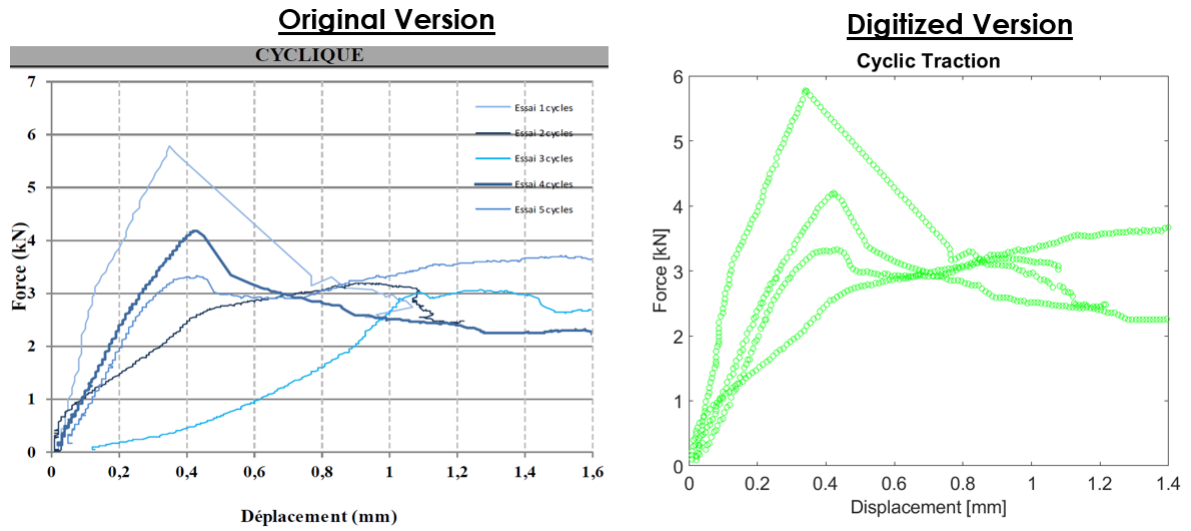


Figura A.10: Configuración 5: ensayo tracción cíclico.

A.6. Configuración 6

A.6.1. Ensayo Tracción Estático

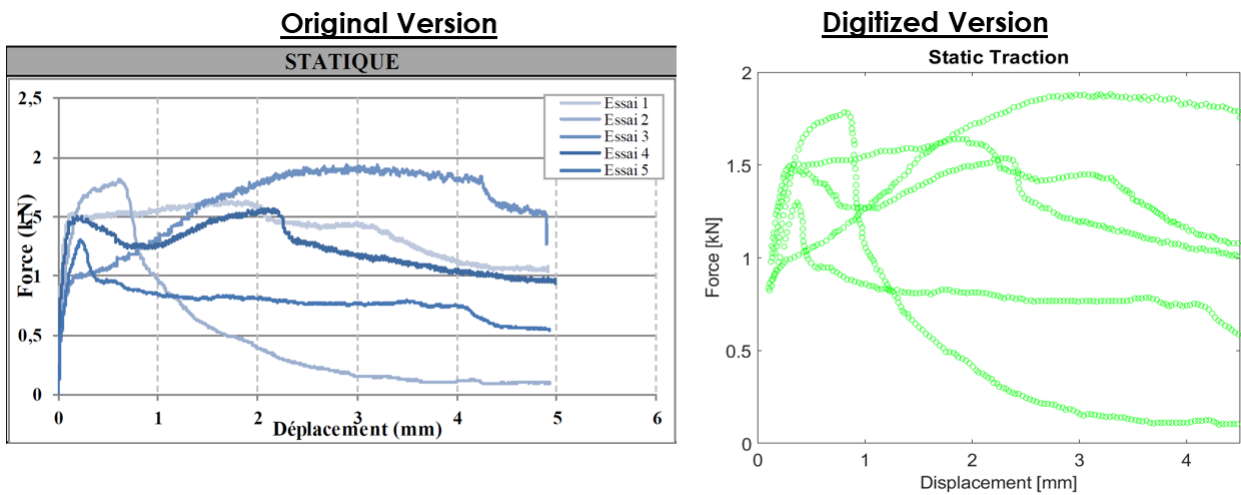


Figura A.11: Configuración 6: ensayo tracción estático.

A.6.2. Ensayo Tracción Cíclico

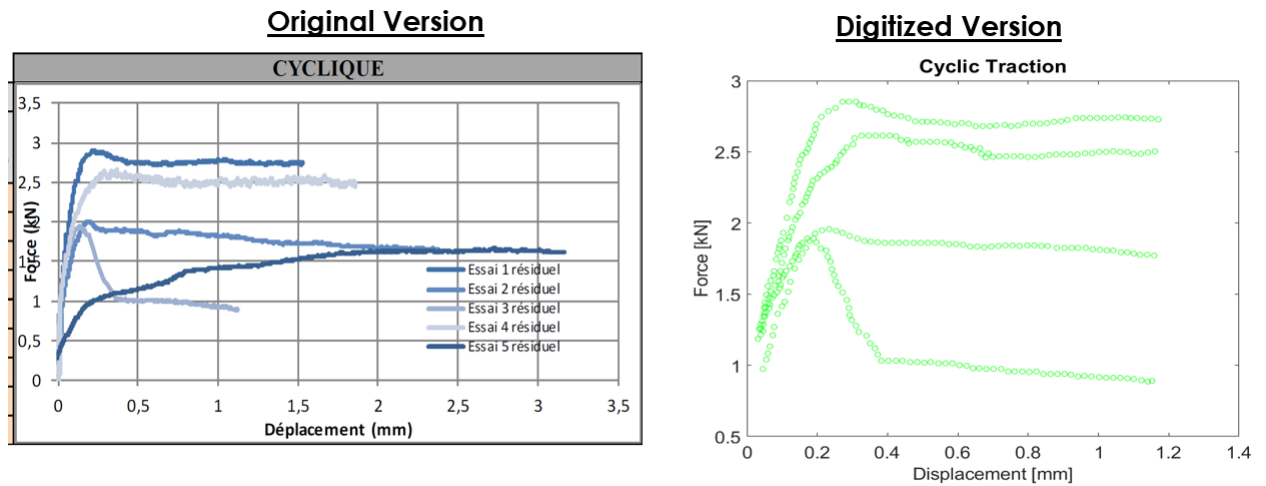


Figura A.12: Configuración 6: ensayo tracción cíclico.

A.7. Configuración 7

A.7.1. Ensayo Tracción Estático

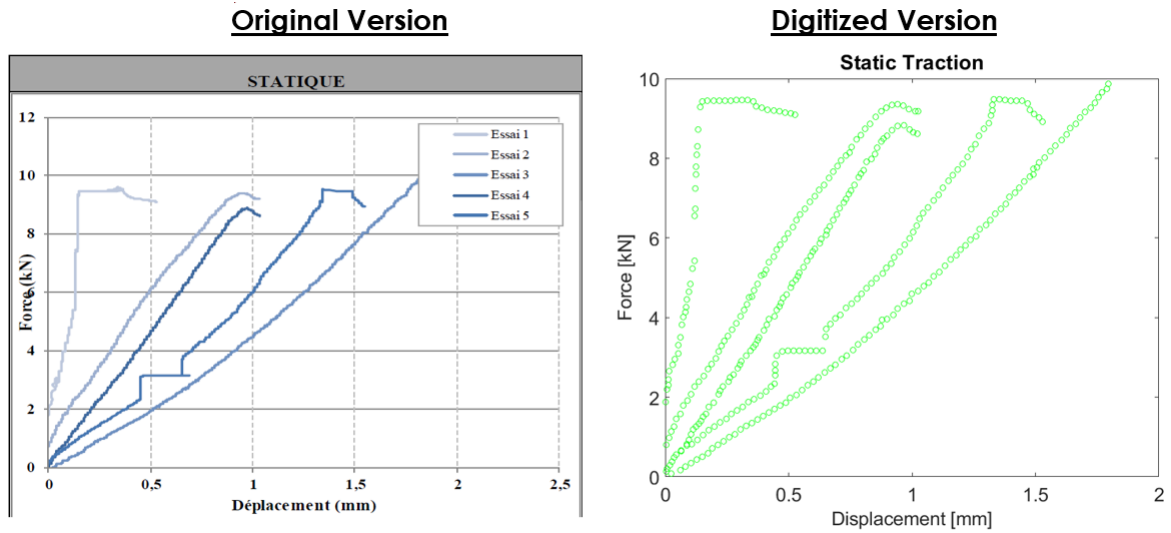


Figura A.13: Configuración 7: ensayo tracción estático.

A.7.2. Ensayo Tracción Cíclico

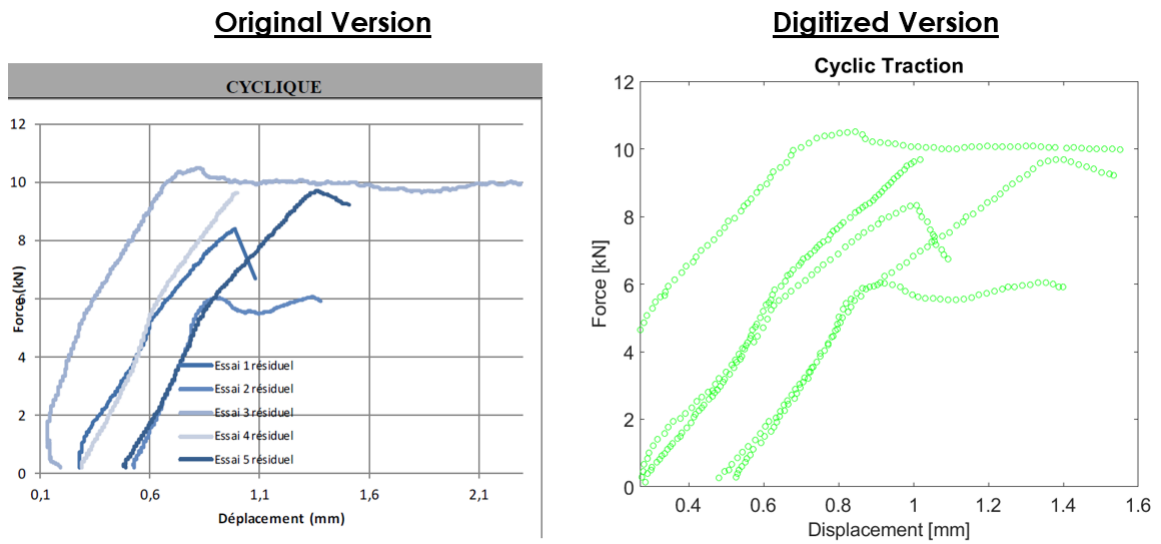


Figura A.14: Configuración 7: ensayo tracción cíclico.

A.8. Configuración 8

A.8.1. Ensayo Tracción Estático

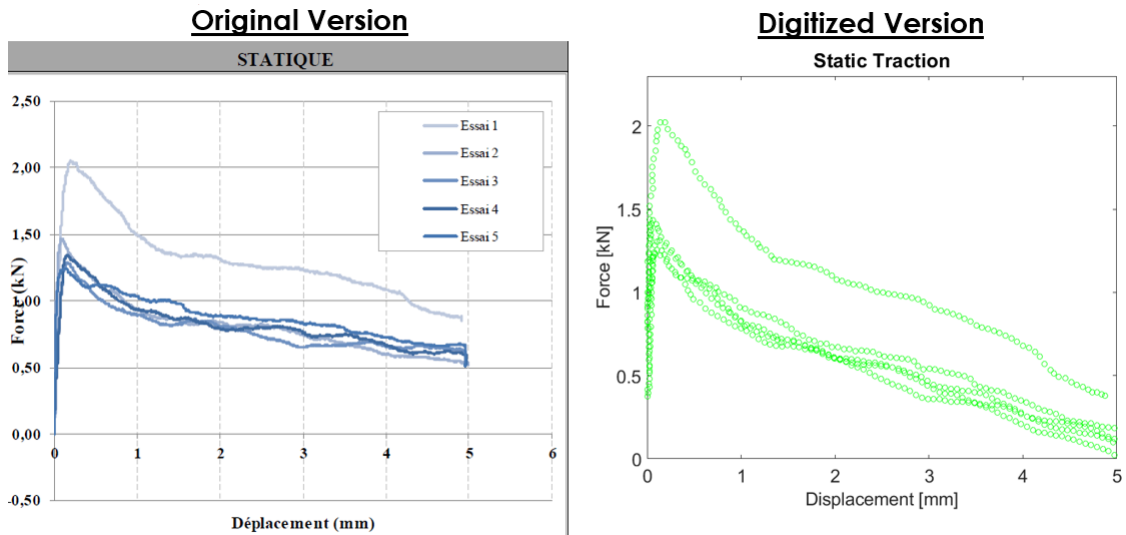


Figura A.15: Configuración 8: ensayo tracción estático.

A.8.2. Ensayo Tracción Cíclico

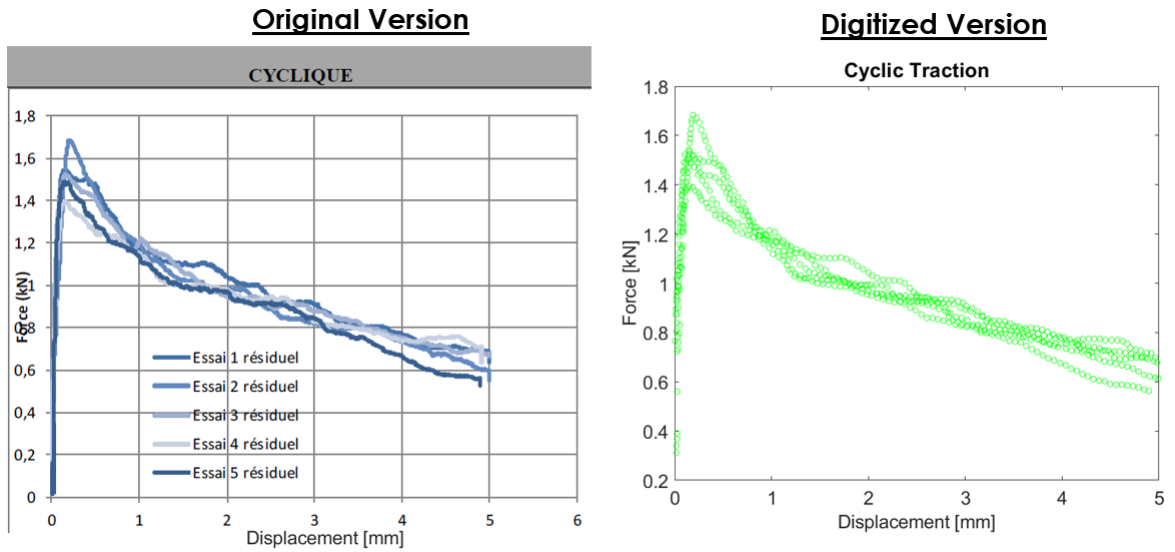


Figura A.16: Configuración 8: ensayo tracción cíclico.

A.9. Configuración 9

A.9.1. Ensayo Tracción Estático

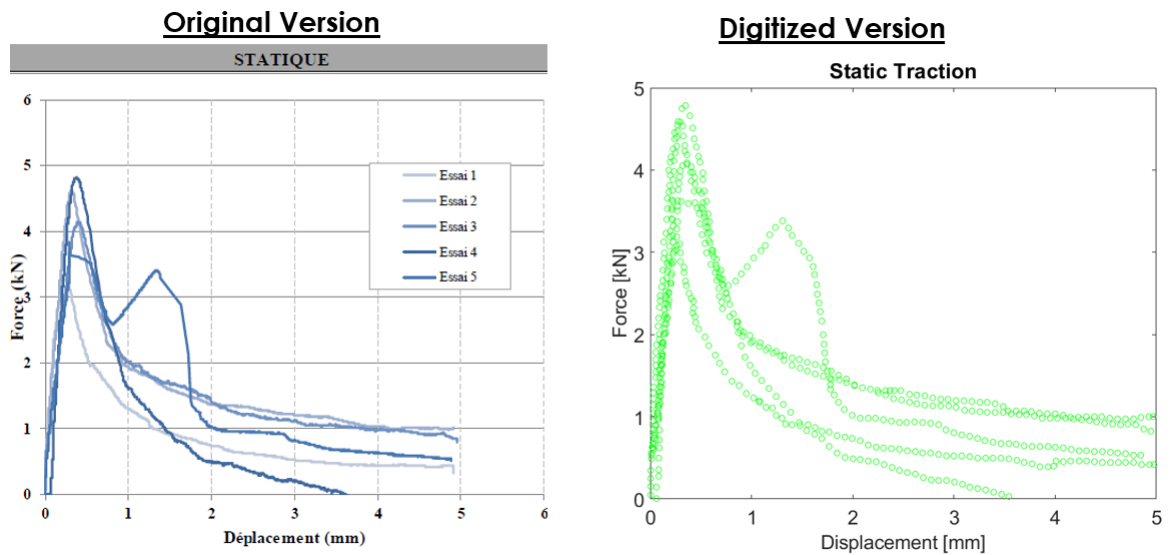


Figura A.17: Configuración 9: ensayo tracción estático.

A.9.2. Ensayo Tracción Cíclico

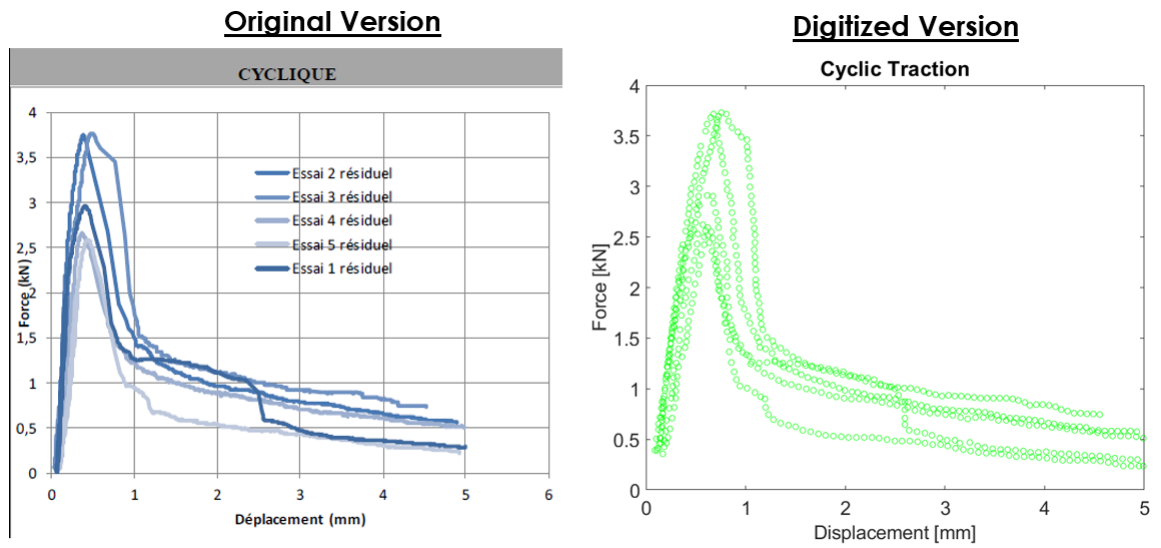


Figura A.18: Configuración 9: ensayo tracción cíclico.