

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la influencia de los depósitos de hierro
en sendas mandíbulas de mamíferos venenosos
(fósil y actual)

Autor/es

Gabriel Beltrán Lostal

Director/es

José Antonio Bea Cascarosa
Javier Bayod López

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2015



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. _____,

con nº de DNI _____ en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
_____, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, _____

Fdo: _____

Estudio de la influencia de los depósitos de hierro en sendas mandíbulas de mamíferos venenosos (fósil y actual)

Resumen

El estudio de este Trabajo Fin de Grado se centra en el análisis de la influencia de los depósitos de hierro que presentan las mandíbulas de dos ejemplares de musaraña. Una mandíbula pertenece a un fósil que procede del yacimiento de Atapuerca (*Dolinasorex glyphodon*) y la otra pertenece a un ejemplar actual de musaraña (*Blarina*).

Para estudiar esta influencia se generan modelos 3D de Elementos Finitos de ambas mandíbulas, y se someten a cargas de distinto carácter, buscando una relación entre las tensiones que se generan y la presencia de los depósitos de hierro.

Los modelos se obtienen mediante el uso de MicroCT (Microtomografía Computerizada), y a partir de la información obtenida se utiliza el programa Mimics con el cual se generan los modelos de Elementos Finitos, y se mallan éstos. Además, gracias al uso de la tecnología MicroCT, es posible la diferenciación de las zonas que poseen hierro en la mandíbula, debido a la distinta absorción de Unidades *Hounsfield* que poseen los depósitos de hierro y el resto de la mandíbula.

Se deben han caracterizado mecánicamente las mandíbulas, y para ello se ha utilizado el ensayo de nanoindentación. Gracias a este ensayo se han podido determinar propiedades mecánicas como el módulo de Young y la dureza de las mandíbulas. Posteriormente se ha realizado un proceso de validación de los valores obtenidos durante el ensayo, y se han asignado estas propiedades a los modelos 3D. Para completar la caracterización, mediante el programa I-Deas NX, se han determinado las zonas de articulación de las mandíbulas y las zonas donde actuará cada carga según el caso a analizar.

Una vez obtenidos y caracterizados los modelos, se ha procedido al cálculo tensional de cada caso a estudiar a través del método de Elementos Finitos. Estos cálculos se ha realizado en el programa Abaqus CAE, y a partir de estos resultados se ha buscado la relación existente entre las tensiones producidas y la presencia de los depósitos de hierro (esmalte pigmentado).

Tras el análisis de los casos, se ha concluido finalmente que existe una relación directa entre la presencia de los depósitos de hierro y las tensiones que se producen en la dentadura durante la mordedura.

Índice

1. Introducción	7
2. Alcance y Objetivos	8
3. Estado del Arte	11
4. Técnicas de Trabajo	12
5. Refinado de malla y caracterización mecánica	14
6. Determinación del Módulo de Young	23
6.1 Resultados y análisis de los resultados del ensayo de nanoindentación para el ejemplar <i>Blarina</i>	24
6.2 Resultados y análisis de los resultados del ensayo de nanoindentación para el ejemplar <i>Dolinasorex glyphodon</i>	28
6.3 Conclusiones sobre el análisis de los resultados del ensayo de nanoindentación	32
7. Cálculo tensional	33
8. Resultados tensionales.....	37
8.1 Tensiones debido a las cargas distribuidas en los molares.....	37
8.2 Tensiones debido a las cargas en los incisivos	42
8.3 Estimación de la fuerza de mordedura	46
9. Análisis morfológico y mecánico de los molares del ejemplar <i>Blarina</i>	56
9.1 Procedimiento	58
10. Conclusiones y Trabajo Futuro	69
11. Referencias	70
12. Bibliografía	71
Anexo I. Edición de los archivos .inp	72
Anexo II. Resultados tensionales obtenidos en los casos de cargas aplicadas sobre los molares..	76

Índice de Figuras

Figura 1. Fotografía de la mitad de la mandíbula inferior del ejemplar Dolinasorex glyphodon.	9
Figura 2. Fotografía de la mitad de la mandíbula inferior del ejemplar Blarina.	9
Figura 3. Mandíbulas del Asoriculus gibberodon proveniente de la Trinchera del Elefante (Atapuerca). Fuente: [2].	11
Figura 4. Articulación Dolinasorex glyphodon. En rojo las zonas de articulación.	15
Figura 5. Articulación Dolinasorex glyphodon. En rojo las zonas de articulación.	16
Figura 6. Articulación Blarina. En rojo las zonas de articulación.	16
Figura 7. Articulación Blarina. En rojo las zonas de articulación.	17
Figura 8. En azul el plano de simetría definido para el Dolinasorex glyphodon. Se puede observar que es perpendicular al eje X.	18
Figura 9. Plano de simetría definido para el Dolinasorex glyphodon.	18
Figura 10. La dirección normal del plano de simetría coincide con el eje X del modelo.	19
Figura 11. Grupos de nodos sobre los que actuarán las cargas molares en el modelo del ejemplar Dolinasorex glyphodon.	20
Figura 12. Identificación de los tres molares del ejemplar Dolinasorex glyphodon.	20
Figura 13. Grupos de nodos sobre los que actuarán las cargas molares en el modelo del ejemplar Blarina.	21
Figura 14. Identificación de los tres pares de molares sobre los que actuarán las cargas en el ejemplar Blarina.	21
Figura 15. Grupo de nodos sobre los que actuarán las cargas producidas en el incisivo del ejemplar Dolinasorex glyphodon.	22
Figura 16. Grupo de nodos sobre los que actuarán las cargas producidas en el incisivo del ejemplar Blarina.	22
Figura 17. Esquema de los datos válidos y los que son desechados según el Criterio de Chauvenet. Fuente: www.ohio.edu (Universidad de Ohio).	25
Figura 18. Valores del módulo de Young recogidos en la nanoindentación para el esmalte pigmentado del ejemplar Blarina, incluyendo el valor de la media y la desviación típica de la misma.	27
Figura 19. Valores del módulo de Young recogidos en la nanoindentación para el esmalte no pigmentado del ejemplar Dolinasorex glyphodon, incluyendo el valor de la media y la desviación típica de la misma.	29
Figura 20. Valores del módulo de Young recogidos en la nanoindentación para el esmalte pigmentado del ejemplar Dolinasorex glyphodon, incluyendo el valor de la media y la desviación típica de la misma.	31
Figura 21. Diferencia absoluta entre el valor de la media total y el de cada muestra del módulo de Young para el esmalte pigmentado del ejemplar Dolinasorex glyphodon.	31

Figura 22. Representación de los vectores de carga sobre los molares del ejemplar Dolinasorex glyphodon.....	34
Figura 23. Representación de los vectores de carga sobre los molares del ejemplar Blarina (1)...	35
Figura 24. Representación de los vectores de carga sobre los molares del ejemplar Blarina (2)...	35
Figura 25. Representación de los vectores de carga sobre los incisivos del ejemplar Blarina. .	36
Figura 26. Representación de los vectores de carga sobre los incisivos del ejemplar Dolinasorex glyphodon.....	36
Figura 27. Estado tensional de la mandíbula del modelo Blarina cuando actúa una carga de 100N sobre sus seis molares (1).....	37
Figura 28. Estado tensional de la mandíbula del modelo Blarina cuando actúa una carga de 100N sobre sus seis molares (2).....	38
Figura 29. Elemento del modelo Blarina donde se registra la mayor tensión de von Mises cuando actúa una carga de 100N sobre sus seis molares.....	38
Figura 30. Estado tensional de la mandíbula del modelo Dolinasorex glyphodon cuando actúa una carga de 50N sobre sus tres molares (1).....	39
Figura 31. Estado tensional de la mandíbula del modelo Dolinasorex glyphodon cuando actúa una carga de 50N sobre sus tres molares (2).....	40
Figura 32. Elemento del modelo Dolinasorex glyphodon donde se registra la mayor tensión de von Mises cuando actúa una carga de 50N sobre sus tres molares.	40
Figura 33. Estado tensional de la mandíbula del modelo Blarina cuando actúa una carga de 100N sobre sus incisivos.	42
Figura 34. Elemento del modelo Blarina donde se registra la mayor tensión de von Mises cuando actúa una carga de 100N sobre sus incisivos.	43
Figura 35. Estado tensional de la mandíbula del modelo Dolinasorex glyphodon cuando actúa una carga de 50N sobre el incisivo.....	44
Figura 36. Elemento del modelo Dolinasorex glyphodon donde se registra la mayor tensión de von Mises cuando actúa una carga de 50N sobre el incisivo.....	44
Figura 37. Captura del programa I-Deas NX donde se muestra la medida realizada para la variable Rm para el ejemplar Dolinasorex glyphodon.....	49
Figura 38. Captura que muestra el valor de la tensión de von Mises en el elemento donde se registra la mayor tensión en el modelo Dolinasorex glyphodon con la nueva carga estimada.	51
Figura 39. Captura del programa I-Deas NX donde se muestra la medida realizada para la variable Rm para el ejemplar Dolinasorex glyphodon.....	52
Figura 40. Captura que muestra el valor de la tensión de von Mises en el elemento donde se registra la mayor tensión en el modelo Blarina con la nueva carga estimada.	54
Figura 41. Fotografía realizada de la mandíbula del ejemplar Blarina.....	56

Figura 42. Fotografía tomada del ejemplar Blarina.	57
Figura 43. Grupo de nodos que conforman el filo de la zona 2 en el Molar 1.....	59
Figura 44. Corte A-A' sobre el modelo de la mandíbula Blarina en el programa I-Deas NX.	60
Figura 45. Corte A-A'	60
Figura 46. Estado tensional del filo del Molar 1.....	61
Figura 47. Primera trayectoria (path) analizada.	62
Figura 48. Segunda trayectoria (path) analizada.	62
Figura 49. Tercera trayectoria (path) analizada.	63
Figura 50. Variación de la tensión en función de la Trayectoria 1.	63
Figura 51. Tensiones Máxima y de Transición en la Trayectoria 1.....	64
Figura 52. Variación de la tensión en función de la Trayectoria 2.	65
Figura 53. Tensiones Máxima y de Transición en la Trayectoria 2.....	66
Figura 54. Variación de la tensión en función de la Trayectoria 3.	67
Figura 55. Tensiones Máxima y de Transición en la Trayectoria 3.....	67
Figura 56. Captura archivo .inp donde se muestra la definición del material.	72
Figura 57. Captura archivo .inp donde se muestra la asignación del material.	73
Figura 58. Captura archivo .inp donde se muestra la definición de las cargas.	73
Figura 59. Captura del archivo .inp donde se muestran los valores que permiten definir el ángulo de la carga.	74
Figura 60. Captura del archivo .inp donde se muestra como definir las condiciones de contorno.....	75
Figura 61. Identificación de los tres pares de molares sobre los que actuarán las cargas en el ejemplar Blarina.	76
Figura 62. Estado tensional de la mandíbula del modelo Blarina cuando actúa una carga de 100N sobre sus primeros molares y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises.	77
Figura 63. Estado tensional de la mandíbula del modelo Blarina cuando actúa una carga de 100N sobre sus segundos molares y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises.	78
Figura 64. Estado tensional de la mandíbula del modelo Blarina cuando actúa una carga de 100N sobre sus terceros molares y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises.	79
Figura 65. Identificación de los tres molares del ejemplar Dolinasorex glyphodon.	80
Figura 66. Estado tensional de la mandíbula del modelo Dolinasorex glyphodon cuando actúa una carga de 50N sobre su primer molar y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises.	81

Figura 67. Estado tensional de la mandíbula del modelo Dolinasorex glyphodon cuando actúa una carga de 50N sobre su segundo molar y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises. 82

Figura 68. Estado tensional de la mandíbula del modelo Dolinasorex glyphodon cuando actúa una carga de 50N sobre su tercer molar y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises. 83

Índice de Tablas

Tabla 1. Resultados nanoindentación para el ejemplar Blarina.....	24
Tabla 2. Valores medio del módulo de Young y dureza en el ejemplar Blarina.....	24
Tabla 3. Valor del Coeficiente de Chauvenet (kC) en función del número de muestras. Fuente: www.ohio.edu (Universidad de Ohio).	26
Tabla 4. Diferencia absoluta entre el valor de la media total y el de cada muestra del módulo de Young para el esmalte pigmentado del ejemplar Blarina.	27
Tabla 5. Resultados nanoindentación para el ejemplar Dolinasorex glyphodon.....	28
Tabla 6. Valores medio del módulo de Young y dureza en el ejemplar Dolinasorex glyphodon....	29
Tabla 7. Diferencia absoluta entre el valor de la media total y el de cada muestra del módulo de Young para el esmalte no pigmentado del ejemplar Dolinasorex glyphodon.	30
Tabla 8. Resumen valores del módulo Young para ambos ejemplares.	32
Tabla 9. Tabla donde se muestran las cinco variables en función de Longitud, Tiempo y Masa.	47

1. Introducción

La sierra de Atapuerca es una pequeña elevación situada a 15 km al este de la ciudad de Burgos. Es probablemente el yacimiento arqueológico y paleontológico más importante de Europa debido a la gran riqueza de restos fósiles, su buena conservación y su importancia científica. Esto le ha servido para ser declarado Patrimonio de la Humanidad, en el año 2000, entre otros reconocimientos.

Para aprovechar el potencial de este yacimiento, en 1977 fue creado el Equipo de Investigación de Atapuerca (EIA). Actualmente la dirección de este equipo pertenece a José María Bermúdez de Castro (Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana), Eudald Carbonell (Universitat Rovira i Virgili de Tarragona) y Juan Luis Arsuaga (Universidad Complutense de Madrid). Al *Proyecto Atapuerca* se fueron sumando paulatinamente universidades, organismos públicos de investigación y otras instituciones.

La Universidad de Zaragoza fue una de las universidades que se unió al *Proyecto Atapuerca*, en concreto el equipo de Microfauna liderado por la Dra. Gloria Cuenca Bescós, perteneciente al grupo de investigación *Aragosaurus*. Entre sus líneas de investigación se encuentra el estudio paleontológico de pequeños vertebrados. Uno de los fósiles obtenidos por su equipo, y el cual va a ser objeto de estudio en este trabajo, es una mandíbula perteneciente a una musaraña que se estima que tiene entre 900.000 y 780.000 años de antigüedad. Su nombre científico es *Dolinasorex glyphodon* y se trata de una especie extinta de musaraña venenosa de gran dimensión, ya que pesaba cuatro veces más que los mamíferos actuales de la misma familia. La particularidad de esta mandíbula es que posee zonas claramente diferenciadas del resto de la mandíbula dada la existencia de depósitos de hierro.

Debido a la necesidad de medir propiedades mecánicas de la mandíbula, y que éstas se han podido alterar con el tiempo, también se va a analizar una mandíbula actual con similares características para poder comparar propiedades y resultados. Esta mandíbula pertenece a una musaraña venenosa actual, que posee la misma peculiaridad que la procedente de Atapuerca, los depósitos de hierro en la mandíbula. Es una musaraña perteneciente al género *Blarina*, de la familia *Soricidae* y suelen habitar en el Norte de América.

Gracias a la colaboración de la Universidad de Zaragoza con el *Proyecto Atapuerca*, la Dra. Gloria Cuenca se puso en contacto con miembros del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura, en concreto con el Dr. José Antonio Bea Cascarosa y el Dr. Javier Bayod López, para proceder al análisis mecánico de estas mandíbulas.

El ámbito de colaboración se formalizó en una propuesta presentada a la convocatoria del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación del Ministerio de Economía y Competitividad, en la cual una de las líneas de trabajo tiene que ver con el análisis de las mandíbulas de los pequeños vertebrados del yacimiento de Atapuerca.

En esta línea de trabajo específica es donde se enmarca el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.

2. Alcance y Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es el estudio de la influencia en el proceso de mordedura de los depósitos de hierro que presentan las mandíbulas de ambas musarañas. Para ello se realizará el cálculo, a través de los modelos de Elementos Finitos de ambas mandíbulas, de las tensiones producidas en las mismas cuando están sometidas a las fuerzas que realizan durante la mordedura. Se tratará de buscar una relación entre la presencia de los depósitos de hierro que ambas presentan y las tensiones que se producen en la dentadura (más en concreto, en el esmalte).

Para ello, uno de los pasos esenciales es caracterizar la mandíbula mecánicamente. Se deberá conocer con exactitud las zonas donde la mandíbula posee depósitos de hierro. Así mismo se deberán obtener determinadas propiedades mecánicas de las mandíbulas, como el módulo de Young o la tensión de rotura. También se deberá comprender el mecanismo de mordedura que poseen ambas musarañas, para poder realizar simulaciones lo más próximas a la realidad.

Se analizarán diferentes casos según la región y el tipo de carga que actúa sobre las mandíbulas. Una vez calculadas las tensiones que se producen, se procederá a analizar la influencia de los depósitos de hierro en estos resultados. Se tratará de distinguir en qué casos la presencia del esmalte pigmentado de hierro es determinante respecto a estas tensiones calculadas. Esto podría indicar que una de las funciones de estos depósitos de hierro es que se han formado para evitar el deterioro o incluso la rotura de la dentadura, ya que el esmalte dental no se regenera una vez dañado.

En cuanto al alcance de este trabajo, se centra en el estudio de las dos mandíbulas de musaraña. Una es la proveniente del yacimiento de Atapuerca (ejemplar *Dolinasorex glyphodon*) y de la que sólo se posee la mitad inferior de la mandíbula (fig. 1) y la otra pertenece a una musaraña actual (ejemplar *Blarina*) de la que sí que se posee la mandíbula inferior completa (fig. 2). En el análisis de las tensiones que se generan en la mandíbula sólo se estudiarán las generadas en la dentadura, ya que es la región de la mandíbula donde la presencia de los depósitos de hierro es más patente.



Figura 1. Fotografía de la mitad de la mandíbula inferior del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.



Figura 2. Fotografía de la mitad de la mandíbula inferior del ejemplar *Blarina*.

Se generarán dos modelos en 3D para el estudio de las tensiones que se generan mediante el método de Elementos Finitos, uno para cada mandíbula, y serán utilizados para todos los casos propuestos. Los dos materiales principales que lo componen se ha determinado que sean elásticos, lineales e isotrópicos, por lo que no se estudiarán fenómenos de plasticidad. Por lo tanto, tan sólo serán necesarias dos constantes para definir cada material, que en este caso serán el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. Así mismo, todos los casos estarán bajo la hipótesis de pequeños desplazamientos y pequeñas deformaciones.

En la primera parte del trabajo, las cargas que se impondrán sobre las mandíbulas serán cargas distribuidas superficiales (presiones). Estas cargas se introducirán de manera nodal, y se analizarán tanto en el ejemplar *Dolinasorex glyphodon*, como en el ejemplar *Blarina*. Mientras que la parte final del estudio tensional se centrará en un parte concreta de los molares del ejemplar *Blarina*. Esto es debido a la forma tan característica en la que se encuentra dispuesto el esmalte de hierro en esta zona del molar, y que podría ayudar a la mejor comprensión de la finalidad de estos depósitos en la mandíbula. La carga que se impone para este último caso, será una carga distribuida lineal a lo largo del filo de esta zona del molar, ya que sería la primera parte del molar que entraría en contacto con la superficie a la cual está penetrando. No será necesario estudiar por tanto fenómenos de contacto como se consideró en un principio.

A efectos de poder comparar las tensiones entre los casos estudiados, la magnitud seleccionada será la tensión de von Mises.

También se ha debido formular la hipótesis de que existe una relación entre la dureza y la resistencia a rotura por compresión, que es el esfuerzo principal al que va a estar sometida la dentadura. Se ha debido realizar esta hipótesis ante la imposibilidad de obtener la resistencia a compresión del esmalte de manera empírica. Esta hipótesis se basa en la relación

que se da en los aceros, donde la tensión de rotura a tracción guarda relación directa con su dureza.

3. Estado del Arte

Hay varios artículos científicos que hablan sobre pequeños vertebrados con pigmentación roja en su dentadura debido a la presencia de hierro. De entre ellos destaca el artículo publicado en la revista Science por Gordon, Joester *et al* [1]. En él se destacan las diferencias existentes en las propiedades entre las mandíbulas pigmentadas y las no pigmentadas en roedores. Debido a su composición química (especialmente en los límites de grano del esmalte), el esmalte pigmentado es más resistente a la corrosión ácida y previene mucho mejor la aparición de caries. También en él se explica que el esmalte pigmentado influye en las propiedades mecánicas. Se demuestra, a través de ensayos de nanoindentación en dentaduras de conejos y castores con pigmentación, que la dureza en la zona del esmalte pigmentada es la mayor de todas. Además esta diferencia de dureza es gradual, siendo la más dura la zona del esmalte pigmentada, después la zona del esmalte no pigmentada del esmalte, y por último la zona interior del diente. En este artículo apuntan a que este gradiente de dureza cumple la función de mantener los bordes del diente afilados.

Otro artículo que ha servido de referencia en este Trabajo Fin de Grado es el escrito por la propia Dra. Gloria Cuenca junto con el Dr. Juan Rofes [2]. En este artículo se describen hasta trece especímenes distintos de la musaraña *Asoriculus Gibberodon* y que también es procedente de Atapuerca (Yacimiento *Trinchera del Elefante*). Se estima que existió durante el Pleistoceno, y que al igual que en las dos mandíbulas a estudio en este Trabajo, posee depósitos de hierro en la dentadura. Asimismo, se realiza una descripción de la dentadura a través de láminas anatómicas donde se detalla su morfología, tamaño y se clasifican las diferentes partes óseas. El artículo fue sugerido por la Dra. Cuenca para poder realizar una analogía entre las mandíbulas que aparecen en él, y la que se va a estudiar en este Trabajo. Esto permite formular hipótesis sobre las zonas en las que la mandíbula va a estar sometida a mayores tensiones durante la mordedura.

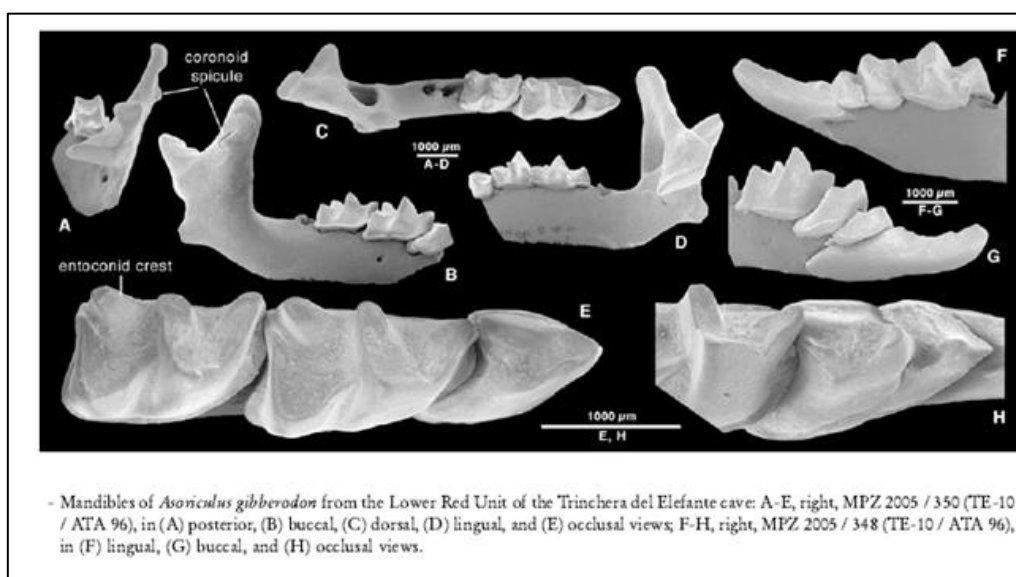


Figura 3. Mandíbulas del *Asoriculus gibberodon* proveniente de la Trinchera del Elefante (Atapuerca). Fuente: [2].

4. Técnicas de Trabajo

A partir de las mandíbulas originales, se debe obtener los modelos en 3D de éstas. Para ello se utilizará la microtomografía computerizada (MicroCT) basada en la formación de imágenes a partir de rayos X y su posterior procesamiento mediante el programa Mimics [3], que permite crear y calcular modelos en 3D. Estos modelos deben ser mallados para poder realizar los análisis mediante Elementos Finitos en los que se basa este Trabajo Fin de Grado.

Una vez obtenidos los modelos mallados de ambas mandíbulas, se va a utilizar el programa I-Deas NX [4], un programa muy intuitivo de diseño de modelos 3D. Una de las características que presenta este programa es que permite generar grupos de nodos o elementos dentro de un mismo modelo, y que éstos tengan características diferentes al resto. Esta función va a ser de gran utilidad para caracterizar mecánicamente los modelos de las mandíbulas.

El siguiente paso será, por tanto, realizar la caracterización mecánica de las mandíbulas. Se definirán diferentes partes dentro de las mandíbulas que son determinantes para su análisis mecánico. Estas regiones son, por ejemplo, las articulaciones que poseen las mandíbulas, donde se deberán definir los apoyos del modelo, o las zonas donde se define que cargas actuarán según el caso a analizar.

Una vez hecha la caracterización de las mandíbulas para cada caso, se procede a exportar estos modelos al programa Abaqus CAE [5]. Este programa permite el modelado, análisis y resolución de gran cantidad de problemas basado en el Método de los Elementos Finitos. Con Abaqus CAE se calcularán las tensiones generadas en los modelos de las mandíbulas para cada caso que se desee estudiar.

Para proceder a estos cálculos, en primer lugar se exportará un archivo .inp desde el programa I-Deas NX. A continuación se procederá a modificar éste, definiendo los parámetros que caracterizarán el problema a resolver en cada caso. Entre estos parámetros se encuentra la fuerza o fuerzas que van a actuar, definiendo su módulo, dirección y sentido. También se definen las condiciones de contorno que se deben imponer, y los materiales de los que está compuesto el modelo. Dentro de la definición de los materiales, los dos parámetros clave (dentro de la hipótesis elástico-lineal) son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

Para determinar el módulo de Young de las dos zonas claramente diferenciadas de la mandíbula, que son la zona que posee los depósitos de hierro y la que no, se han utilizado ensayos de nanoindentación. Estos ensayos de dureza a pequeña escala permiten determinar el módulo de Young y la dureza de los materiales ensayados. Se analizan estos resultados, viendo que son coherentes y que no hay ningún valor descartable debido a algún fallo de medición.

Definidos los módulos de Young de ambos materiales, ya es posible completar todos los parámetros necesarios para definir cada caso en su correspondiente archivo .inp. Estos archivos son los que posteriormente se ejecutarán en el programa Abaqus CAE.

Los primeros casos analizados en la memoria se basan en el análisis de las tensiones que se producen debido a la actuación de cargas de carácter superficial (presiones) sobre los molares y los incisivos. Solamente se van a analizar las tensiones generadas en la dentadura, ya que comprender la función de los depósitos de hierro en ella es el objeto a estudio de este trabajo. Se obtendrán las tensiones de von Mises máximas para cada caso, y en qué zonas se producen. Se buscará si estas cargas superficiales son la causa de que estos dos ejemplares de musaraña hayan desarrollado depósitos de hierro en su dentadura o bien descartaremos esta hipótesis.

Mediante una analogía realizada entre la mordedura humana y la de las musarañas a través del Teorema π de Vaschy-Buckingham, se va a estimar la fuerza de mordedura que realizarían ambos ejemplares cuando se produce la penetración de los incisivos en sus víctimas. Así mismo se va a tratar de determinar si se podrían fracturar los incisivos debido a esta mordedura, ya que la conservación de éstos es indispensable para su subsistencia.

Analizadas las cargas superficiales y las tensiones que éstas generan, se pasa por último al análisis más en profundidad de la morfología que presenta la mandíbula del ejemplar *Blarina*. En la mandíbula de este ejemplar, al ser más reciente, se pueden observar mucho mejor definidas las zonas del esmalte pigmentado y la disposición que tienen los depósitos en la mandíbula.

En este caso, las cargas se van a aplicar en una zona más concreta de los molares, donde la disposición de los depósitos es muy singular. Se van a aplicar cargas de tipo lineal en el filo de esta zona del molar, simulando las fuerzas a las que se vería sometida esta zona cuando comienza la mordedura del animal sobre la superficie en la que penetra. Se analizarán las tensiones que se han generado sobre el molar a estudio, en especial la tensión máxima y la tensión que se produce en la zona de transición entre el esmalte pigmentado y no pigmentado. Por último se comparará la relación que existe entre estas dos tensiones con la relación que existe entre las durezas del esmalte pigmentado y no pigmentado. La similitud de estas relaciones podría justificar la presencia del esmalte pigmentado en el filo de esta zona de los molares.

5. Refinado de malla y caracterización mecánica

La primera fase del estudio es conseguir modelos 3D virtuales a partir de las mandíbulas originales. Para ello se ha utilizado la microtomografía computerizada (MicroCT). La microtomografía computerizada es la formación de imágenes a partir de rayos X en 3D mediante el mismo método utilizado en exploraciones de tomografía computerizada hospitalaria, aunque a pequeña escala y con una resolución muy superior. En nuestro caso se ha utilizado el MicroCT GE eXplore Locus SP (General Electrics), equipo que se encuentra en el edificio I+D situado en el Campus Río Ebro de la Universidad de Zaragoza. Es un Tomógrafo Axial Computerizado diseñado para el estudio de la microestructura y la tomografía de muestras *in vitro*. El equipo permite estudiar, de manera no destructiva, muestras de hasta 40 milímetros de diámetro con una resolución de hasta 10 micras. Con este tomógrafo de rayos X se puede determinar la microestructura a nivel morfológico en diferentes tipos de tejidos tisulares, implantes, etc. El equipo MicroCT usa una tecnología de haz cónico volumétrico que permite obtener la imagen completa del volumen del espécimen estudiado con una sola rotación, haciéndolo “corte a corte”, lo que brinda una excelente calidad de imagen y relación señal-ruido. Gracias a esta tecnología es posible diferenciar entre las zonas de la mandíbula que poseen hierro de las que no, debido a la diferente absorción de Unidades *Hounsfield* que posee cada una de las zonas. La diferenciación es posible incluso en zonas de hierro que no se aprecian a simple vista, y que se encuentran en el interior de la mandíbula. Esta distinción permite poder asignar distintas propiedades mecánicas a las zonas que poseen hierro de las que no, lo que proporciona una gran ventaja a la hora de caracterizar las mandíbulas.

Una vez obtenidos estos modelos, se procesan en el programa Mimics (Materialise NV). Mimics es un software de procesamiento de imágenes para el diseño y modelado 3D, y se utiliza para crear y calcular modelos de superficie 3D a partir de pilas de datos de imágenes 2D, como las que se generan en el MicroCT, con una gran precisión.

Una vez obtenidos los modelos se procede a mallarlos, lo que permitirá más adelante el análisis mediante Elementos Finitos.

Con ambas mandíbulas malladas, se procede a su refinado y a determinar las diferentes zonas que caracterizarán su comportamiento mecánico. Para esta etapa se utiliza el programa I-Deas NX, un sistema de diseño 3D de alto rendimiento, cuyas capacidades de dibujo pueden ser utilizadas como una herramienta para documentar modelos sólidos o utilizarlo como sistema de dibujo 2D. El refinado es necesario ya que pese a la gran precisión que se ha obtenido en los modelos siempre aparecen pequeñas irregularidades que deben ser corregidas.

Refinada la malla, se crean diferentes grupos de elementos o nodos. Esto permite asignar propiedades o características concretas diferenciando a estos grupos del resto del modelo. Debido al uso del MicroCT y su posibilidad de distinguir entre diferentes materiales, lo primero que se realiza es un grupo con elementos que poseen hierro y otro con el resto de elementos de la mandíbula. Además se eliminan todos los elementos *Shell* (superficiales), ya

que para nuestro análisis no va a ser necesaria su presencia, ya que las cargas distribuidas se van a aplicar de manera nodal.

Tras la eliminación de los elementos *Shell* y refinada la malla, el modelo de la mandíbula del ejemplar *Blarina* posee 40.909 nodos y 188.465 elementos tetraédricos. Mientras que el modelo de la mandíbula del ejemplar *Dolinasorex glyphodon* consta de 31.761 nodos 150.479 elementos tetraédricos. Estos modelos se emplearán para todos los cálculos posteriores.

El siguiente punto a abordar es saber dónde articula cada mandíbula, ya que eso determinará como serán los apoyos en nuestro modelo. Para esta parte contamos con la colaboración de la Dra. Gloria Cuenca dada su amplia experiencia en este campo, la cual dio el visto bueno al resultado final de los modelos de ambas mandíbulas. La Dra. Cuenca nos indicó cuales eran las zonas de articulación, y se decidió que para el posterior análisis mediante Elementos Finitos estas zonas tendrían impedido el movimiento en los tres ejes (como un encastre). Además se crea un grupo con los nodos que se encuentran en las zonas de apoyo, para que el movimiento impedido en los tres ejes sólo esté limitado a estos y no afecte al resto del modelo. Para el modelo de la mandíbula del *Dolinasorex glyphodon*, como se ha comentado previamente, sólo se posee media mandíbula inferior por lo que hay tres zonas principales de articulación (Fig. 4 y Fig. 5). Mientras que para la mandíbula del *Blarina* se posee la mandíbula inferior completa, por lo que en vez de haber tres zonas hay seis (el doble debido a la simetría) (Fig. 6 y Fig. 7).

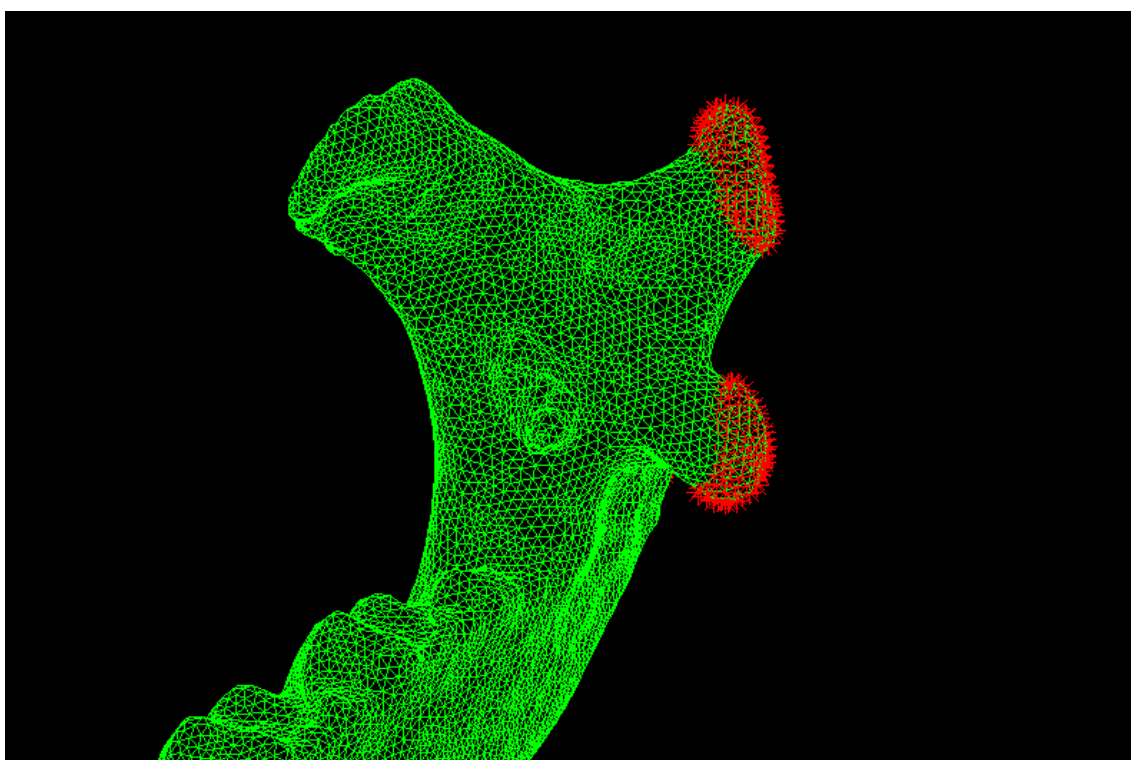


Figura 4. Articulación *Dolinasorex glyphodon*. En rojo las zonas de articulación.

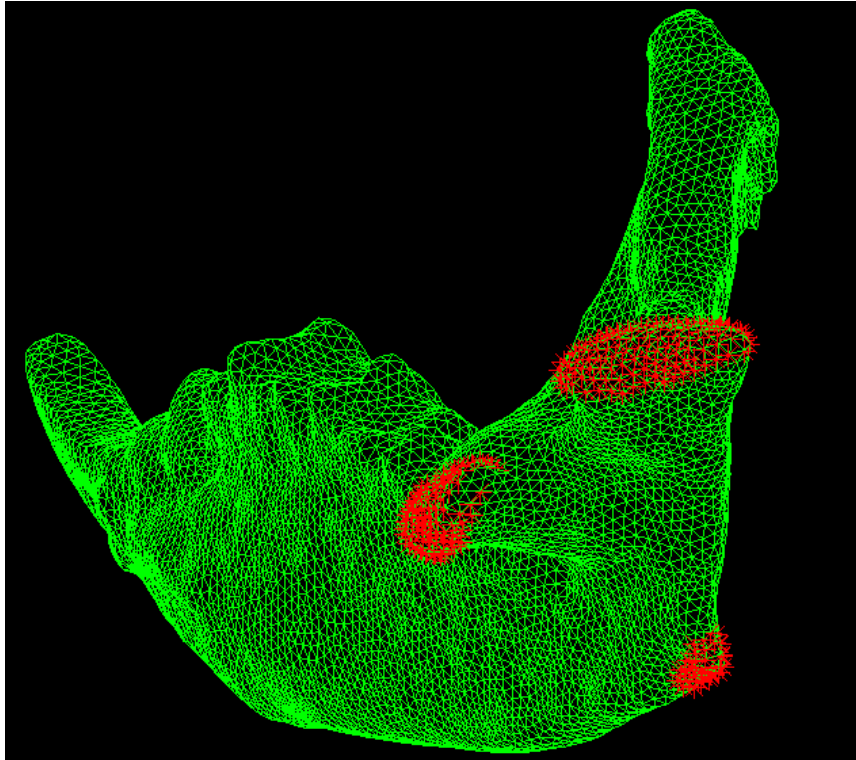


Figura 5. Articulación *Dolinatorex glyphodon*. En rojo las zonas de articulación.

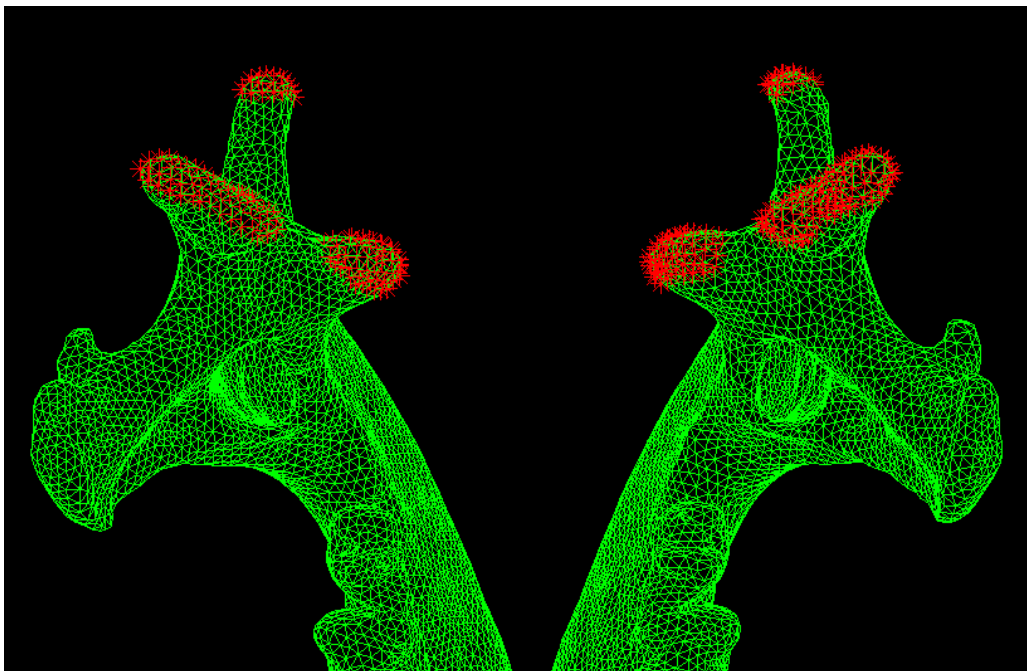


Figura 6. Articulación *Blarina*. En rojo las zonas de articulación.

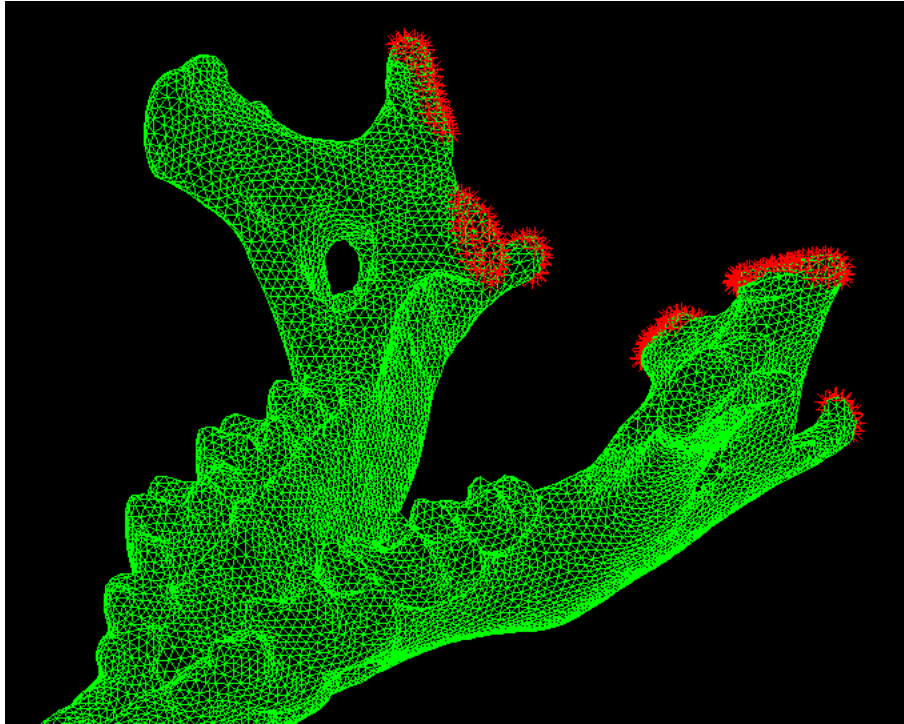


Figura 7. Articulación *Blarina*. En rojo las zonas de articulación.

Debido a que de la mandíbula procedente del yacimiento de Atapuerca (*Dolinasorex glyphodon*) sólo se posee la mitad inferior izquierda, se ha estimado razonable determinar un plano de simetría en ella, ya que el caso más común (y por tanto el que se desea simular en este estudio) es que muerda de manera simétrica y no haya una diferencia significativa entre las fuerzas que ejerce cada una de las mitades inferiores. Se vuelve a crear un grupo de nodos en este modelo que determinará la zona de simetría. Como es ya sabido, la condición para que exista simetría es que el desplazamiento en el eje perpendicular al plano de simetría sea cero, por lo que los nodos que determinan la región de simetría deberán tener impedido el desplazamiento en este eje. Para facilitar este paso se ha hecho coincidir uno de los tres ejes principales del modelo con un eje que se ha estimado que es perpendicular al plano de simetría. Así, al grupo de nodos que conforman el plano de simetría hay que imponer que el desplazamiento en este eje (en nuestro caso el eje X) sea cero. (Fig. 8, Fig. 9 y Fig. 10). Para hacer una aproximación sobre cuál es el plano de simetría nos hemos basado en la mandíbula actual (la del espécimen *Blarina*) y se ha realizado una analogía entre ellas.

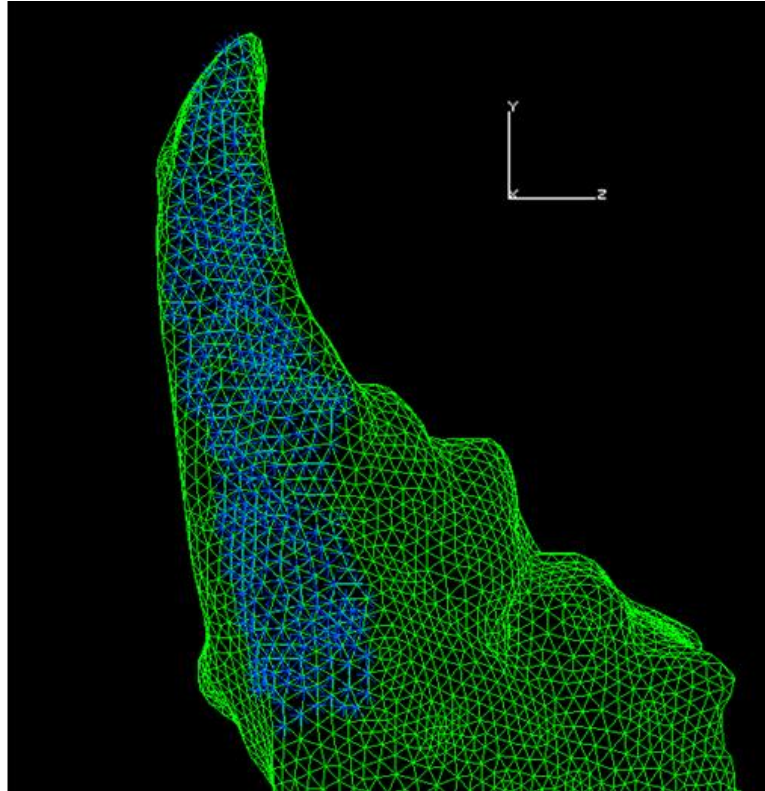


Figura 8. En azul el plano de simetría definido para el *Dolinasorex glyphodon*. Se puede observar que es perpendicular al eje X.

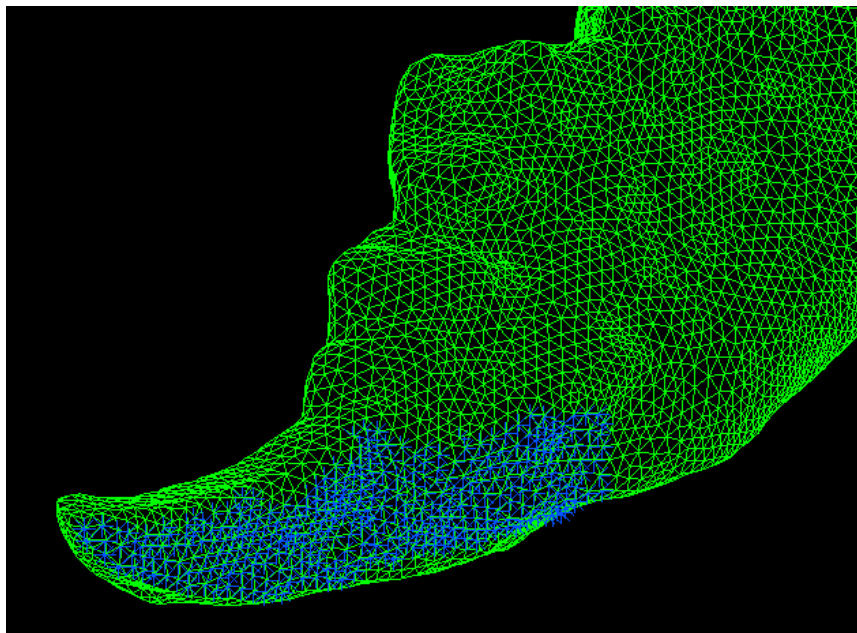


Figura 9. Plano de simetría definido para el *Dolinasorex glyphodon*.

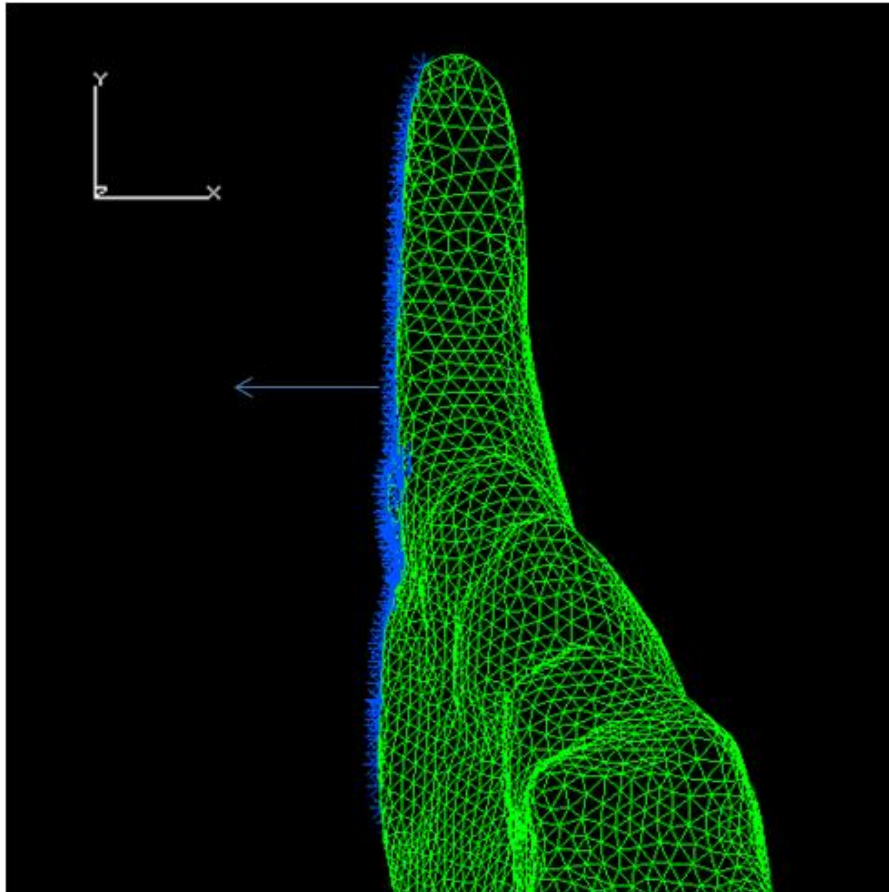


Figura 10. La dirección normal del plano de simetría coincide con el eje X del modelo.

Una vez creados estos grupos, faltaría determinar las zonas sobre las que actuarán principalmente las cargas. Las cargas que se van a aplicar en esta primera parte del estudio son cargas distribuidas (presiones), por lo que se hace es dividir la carga total que va a actuar entre el número de nodos sobre los que actuaría esta presión. Tanto en la mandíbula del *Dolinasorex glyphodon* como en la del espécimen *Blarina* se ha estimado que estas zonas serán las crestas de los molares y la punta del incisivo. En ambos ejemplares hay tres molares por cada semi-mandíbula inferior, por lo que la mandíbula procedente del yacimiento de Atapuerca posee tres molares, y la mandíbula actual posee seis. Del mismo modo en el que se han creado el resto de grupos anteriores (articulaciones y plano de simetría), con los nodos que se encuentran en las crestas de los molares y los nodos que están en la punta del incisivo se generan nuevos grupos (uno por molar y otro para la punta del incisivo). Esto permitirá que sobre los nodos que formen estos grupos se les apliquen cargas según el módulo, dirección y sentido que se desee estudiar, haciendo así que las cargas estén aplicadas exclusivamente en estas zonas.

Los grupos de las cargas sobre los molares se muestran en las siguientes imágenes:

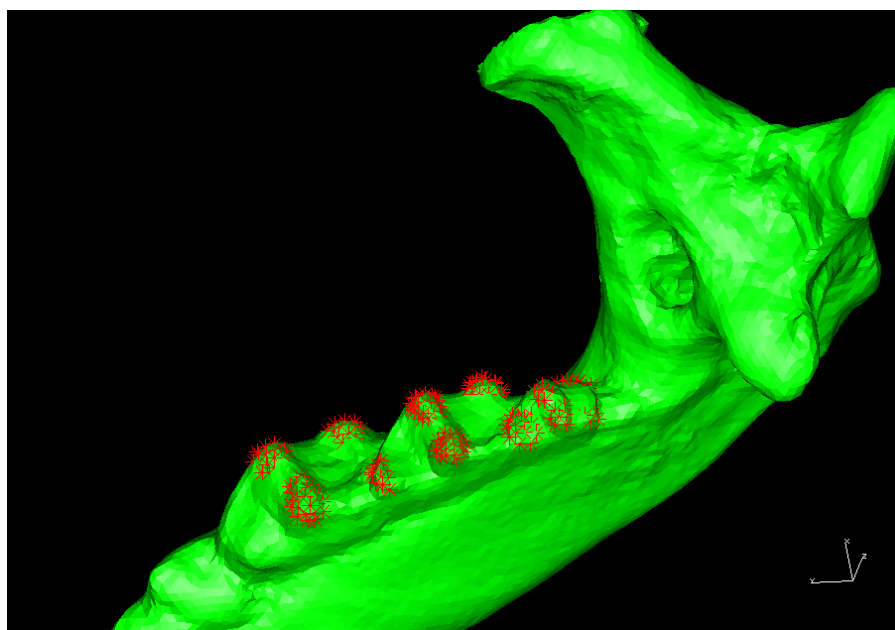


Figura 11. Grupos de nodos sobre los que actuarán las cargas molares en el modelo del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

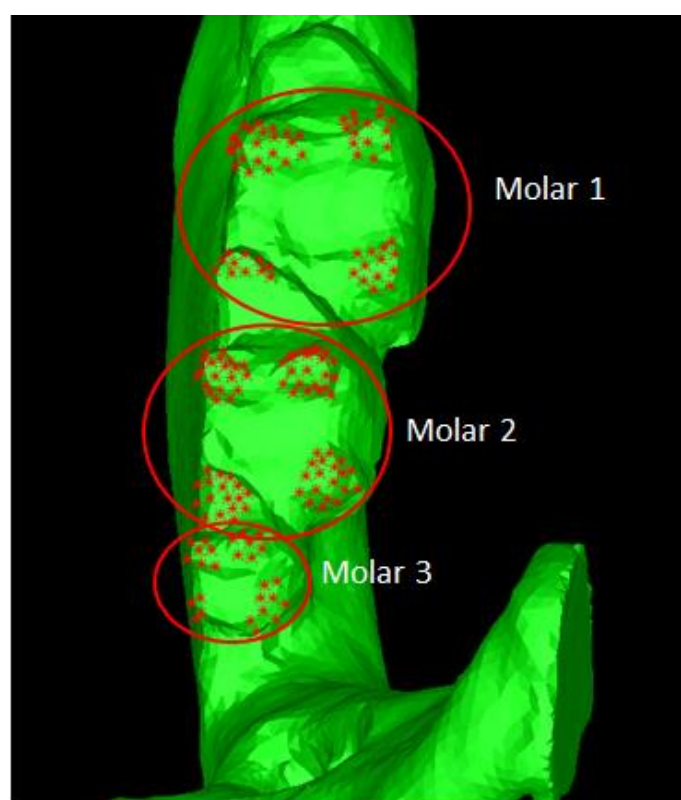


Figura 12. Identificación de los tres molares del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

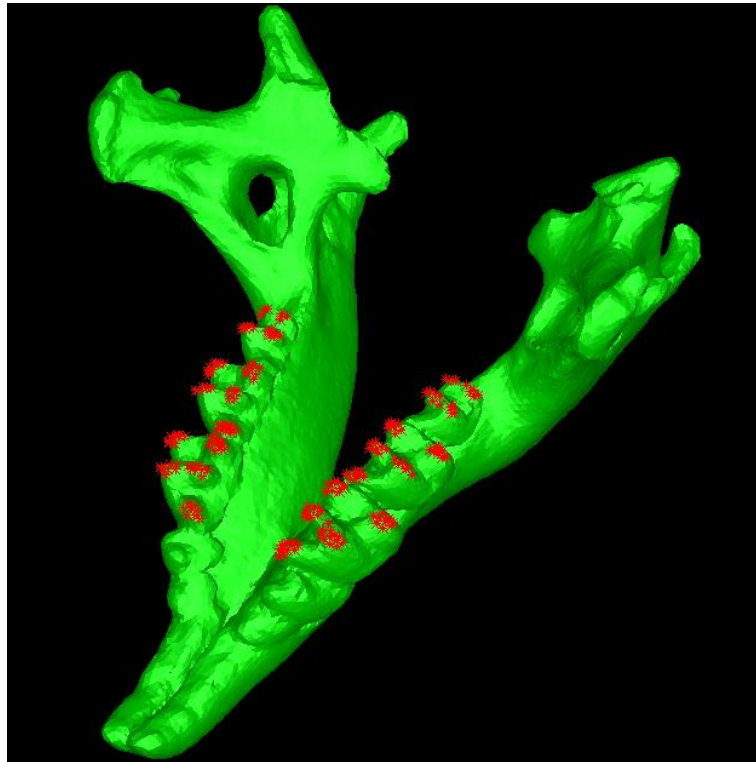


Figura 13. Grupos de nodos sobre los que actuarán las cargas molares en el modelo del ejemplar *Blarina*.

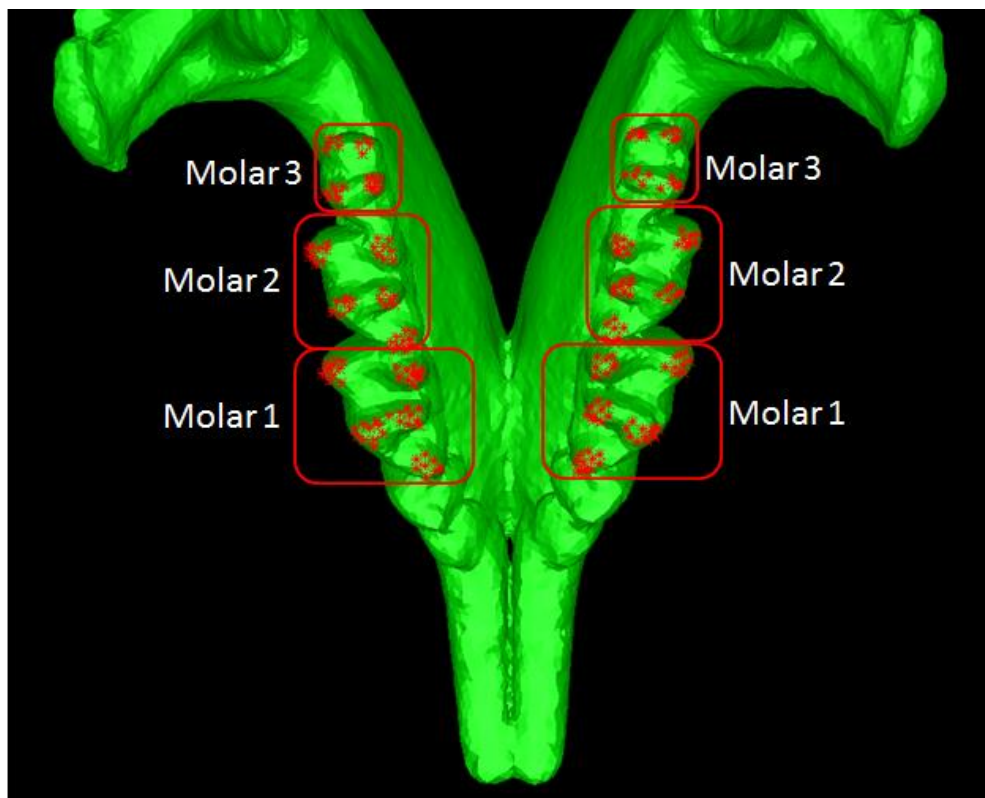


Figura 14. Identificación de los tres pares de molares sobre los que actuarán las cargas en el ejemplar *Blarina*.

Y los grupos que formarán las cargas sobre los incisivos se muestran también a continuación:

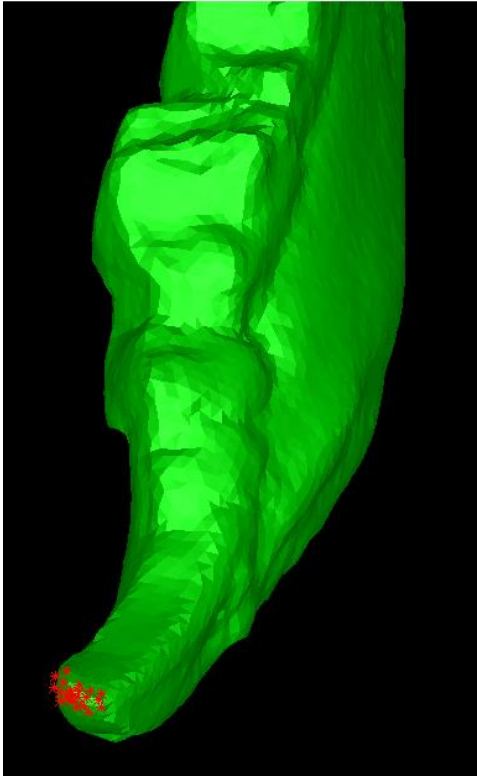


Figura 15. Grupo de nodos sobre los que actuarán las cargas producidas en el incisivo del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

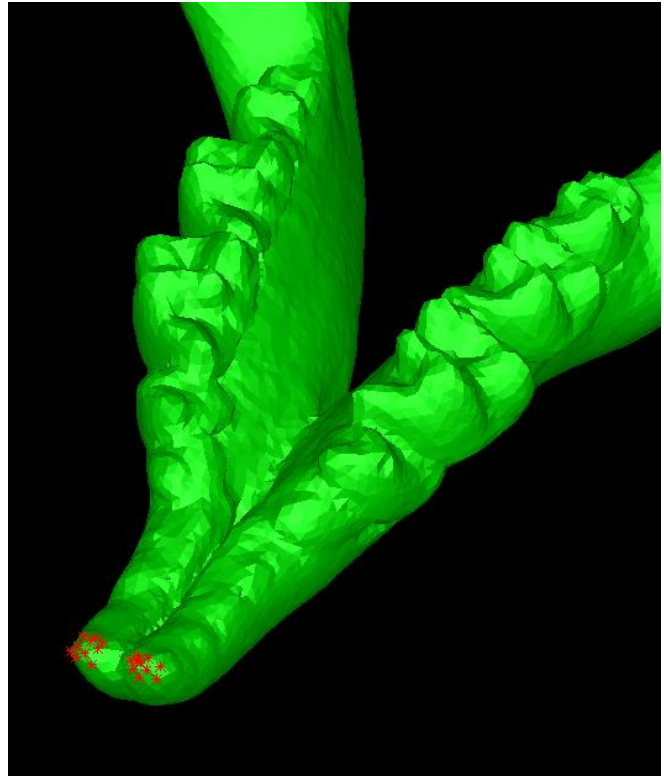


Figura 16. Grupo de nodos sobre los que actuarán las cargas producidas en el incisivo del ejemplar *Blarina*.

Antes de poder proceder a realizar los cálculos correspondientes, y una vez determinadas todas las zonas en ambos modelos donde se aplicaran las cargas, es necesario determinar el módulo de Young. Este parámetro es clave para poder realizar el cálculo de tensiones en un problema elástico lineal.

6. Determinación del Módulo de Young

Para poder determinar el módulo de Young en ambas mandíbulas se ha utilizado la técnica de nanoindentación. La nanoindentación es un ensayo de dureza llevado a cabo a la escala de longitudes nanométricas. Se utiliza una punta pequeña para indentar (realizar una huella medible) el material objeto de estudio. La carga impuesta y el desplazamiento se miden de manera continua con una resolución de micronewtons y subnanómetros, respectivamente. Las técnicas de nanoindentación son importantes para la medición de las propiedades mecánicas a micro y nanoescala. Con esta técnica es posible determinar el módulo de Young y la tensión de rotura de las muestras ensayadas. Esta técnica ha resultado idónea dadas las características mecánicas y el tamaño de las muestras.

En nuestro caso se ha utilizado el nanoindentador “G200 Nano Indenter” utilizando el modo CSM (*Continuous Stiffness Measurement*). Este nanoindentador es fabricado por la compañía Agilent Technologies. Se ha realizado este ensayo en las dos mandíbulas para poder comparar los resultados obtenidos en ambas. A la vista de los resultados será posible analizar si los valores obtenidos son congruentes, o por el contrario, hay grandes diferencias entre ellos. Se ha realizado dentro de cada mandíbula una distinción entre la zona que no posee depósitos de hierro y las que sí lo tienen, para también poder ver si existen diferencias mecánicas entre ellas.

6.1 Resultados y análisis de los resultados del ensayo de nanoindentación para el ejemplar *Blarina*

Los resultados obtenidos en el ensayo de nanoindentación para la mandíbula de la musaraña *Blarina* son los siguientes:

Mandíbula <i>Blarina</i> (ejemplar actual)		
Zona hueso (sin depósitos de hierro):		
Número de nanoindentación	Avg Modulus [300-1400 nm]	Avg Hardness [300-1400 nm]
1	32,8	1,87
2	32,4	1,95
3	31,6	1,87
4	30,6	1,62
Zona con depósitos de hierro:		
Número de nanoindentación	Avg Modulus [300-1400 nm]	Avg Hardness [300-1400 nm]
1	34,6	0,93
2	38,9	1,34
3	31,4	1,37
4	52,3	1,79
5	49,2	2,05
6	42,1	1,52
7	42,9	1,75
8	35,7	1,55
9	49,5	1,88

Tabla 1. Resultados nanoindentación para el ejemplar *Blarina*.

El módulo de Young aparece en la columna de **Avg. Modulus** y la dureza en la columna **Avg. Hardness** y aparecen expresadas ambas en GPa. El módulo de Young sí que va a ser ampliamente analizado en este apartado, mientras que los valores de dureza medios serán tratados más adelante.

A partir de los datos de la tabla 1 se obtienen la media del módulo de Young y de la dureza en cada zona:

Blarina	Zona hueso (sin depósitos de hierro) [GPa]	Zona con depósitos de hierro [GPa]
Media Módulo Young	31,85	41,84
Media Dureza	1,83	1,58

Tabla 2. Valores medio del módulo de Young y dureza en el ejemplar *Blarina*.

A continuación se analiza si alguno de los valores se puede descartar debido a algún fallo de medición. Como se puede observar en la tabla 1, en la zona de hueso los datos son

muy homogéneos, por lo que se dan por válidos todos ellos. En la zona con depósitos de hierro hay mayor dispersión, por lo que se va a proceder a realizar un pequeño estudio estadístico para ver si algún resultado es descartable (*outlier*).

El criterio que se va a seguir para comprobar que no hay ningún dato descartable es el criterio de Chauvenet. Este método se basa en que la muestra sigue una distribución Normal para determinar la probabilidad de que un dato sea dudoso. El criterio establece que todos los datos deben estar en una banda alrededor de la media que corresponde a una probabilidad de $1 - [1/(2N)]$, siendo N el número de muestras tomadas. En otras palabras, se descartaran los datos donde la probabilidad de obtener su desviación respecto a la media es menor que $1/2N$.

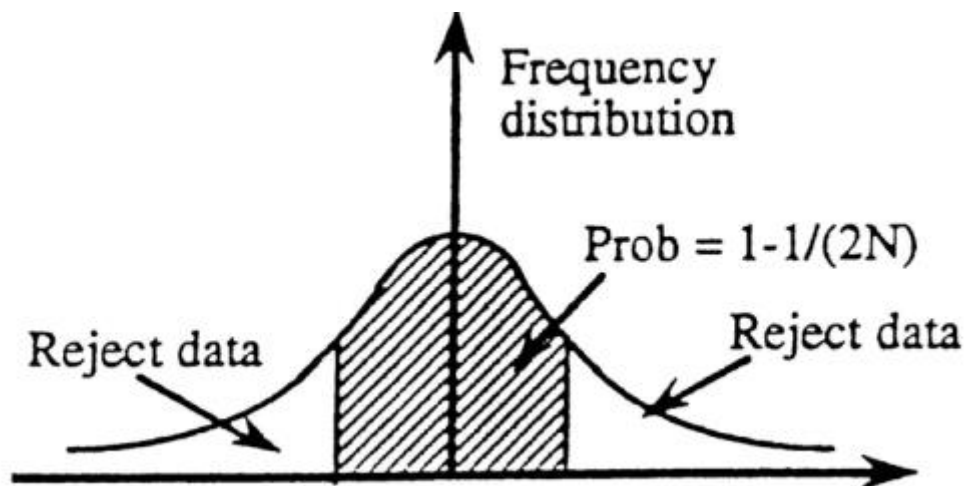


Figura 17. Esquema de los datos válidos y los que son desechados según el Criterio de Chauvenet.
Fuente: www.ohio.edu (Universidad de Ohio).

La desviación máxima de un dato respecto a la media se obtiene de la siguiente manera:

$$D_{max} = k_C \sigma$$

Donde k_C es el coeficiente de Chauvenet y varía según el tamaño de muestra (Tabla 3), y σ es la desviación típica de la muestra.

Chauvenet's Criterion for Rejecting a Reading

Number of Readings (N)	Ratio of Maximum Acceptable Deviation to Precision Index (d_{\max}/S_X)
3	1.38
4	1.54
5	1.65
6	1.73
7	1.80
8	1.87
9	1.91
10	1.96
15	2.13
20	2.24
25	2.33
50	2.57
100	2.81
300	3.14
500	3.29
1,000	3.48

Tabla 3. Valor del Coeficiente de Chauvenet (k_C) en función del número de muestras.
Fuente: www.ohio.edu (Universidad de Ohio).

Un valor se **descartará** si:

$$|\bar{X} - X_i| > k_C \sigma$$

Donde \bar{X} es la media de la muestra y X_i es el valor de la muestra i .

En primer lugar, mediante una gráfica y una tabla adjunta, se muestran los datos recogidos, la media y la desviación típica para las muestras de la zona con depósitos de hierro del ejemplar *Blarina*:

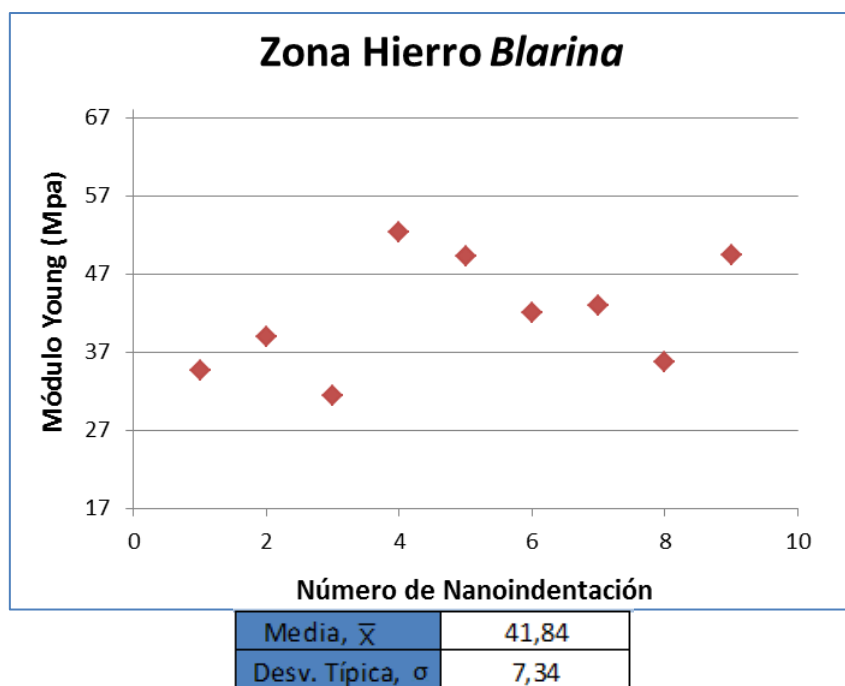


Figura 18. Valores del módulo de Young recogidos en la nanoindentación para el esmalte pigmentado del ejemplar *Blarina*, incluyendo el valor de la media y la desviación típica de la misma.

A continuación se obtienen todos los valores $|\bar{X}-X_i|$, ya que la media ya ha sido calculada (fig. 18) y se muestra en la siguiente figura:

Número de muestra	$ \bar{X}-X_i $
1	7,24
2	2,94
3	10,44
4	10,46
5	7,36
6	0,26
7	1,06
8	6,14
9	7,66

Tabla 4. Diferencia absoluta entre el valor de la media total y el de cada muestra del módulo de Young para el esmalte pigmentado del ejemplar *Blarina*.

El siguiente paso es determinar el valor de la desviación máxima, D_{\max} . El valor de la desviación típica ya ha sido calculado como se muestra en la figura 18 ($\sigma = 7,34$). El valor de k_c se obtiene de la tabla 3, siendo en este caso para $N=9$, $k_c=1,91$. Por lo que la desviación máxima será:

$$D_{\max} = k_c \sigma = 1,91 * 7,34 = 14,01$$

Como se puede observar, no se cumple en ninguna muestra el caso de $|\bar{X}-X_i| > k_c \sigma$, por lo que todos los datos son válidos, y el valor del módulo de Young en la zona con depósitos de hierro continúa siendo el calculado en la tabla 2.

6.2 Resultados y análisis de los resultados del ensayo de nanoindentación para el ejemplar *Dolinasorex glyphodon*

Se procede a continuación a estudiar las muestras tomadas para el módulo de Young en la mandíbula del espécimen *Dolinasorex glyphodon*. Se seguirá la misma metodología y criterios seguidos para el caso del ejemplar *Blarina*.

En la tabla 5 se muestran los datos recogidos en el ensayo de nanoindentación:

Mandíbula <i>Dolinasorex glyphodon</i> (Ejemplar procedente de Atapuerca)		
Zona hueso (sin depósitos de hierro):		
Número de nanoindentación	Avg Modulus [300-1400 nm]	Avg Hardness [300-1400 nm]
1	28	0,81
2	26,1	0,77
3	16,5	0,34
4	19,8	0,32
5	28,3	0,83
6	24,8	0,59
7	25,3	0,62
8	19,2	0,35
Zona hierro:		
Número de nanoindentación	Avg Modulus [300-1400 nm]	Avg Hardness [300-1400 nm]
1	11,3	0,27
2	24	0,64
3	24,6	0,55
4	27,2	0,65
5	17,2	0,46
6	10,4	0,33

Tabla 5. Resultados nanoindentación para el ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

De una manera análoga al caso anterior, se calcula la media del módulo de Young (**Avg. Modulus**) , así como la dureza (**Avg. Hardness**) en las zonas con depósito de hierro y las que no poseen estos depósitos, medidas ambas en GPa. Como sucedía en el caso del ejemplar *Blarina*, se va a analizar en detalle los datos recogidos para el módulo de Young, mientras que los resultados de la dureza serán tratados posteriormente.

En la siguiente tabla se muestran la media del módulo de Young y de la dureza para ambas zonas:

Dolinasorex glyphodon	Zona hueso (sin depósitos de hierro) [GPa]	Zona con depósitos de hierro [GPa]
Media Módulo Young	23,50	19,12
Media Dureza	0,58	0,48

Tabla 6. Valores medio del módulo de Young y dureza en el ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

Se volverá a comprobar si algún dato del módulo de Young obtenido durante el ensayo es descartable recurriendo de nuevo al criterio de Chauvenet.

Se va a analizar en primer caso los valores obtenidos para el módulo de Young para las zonas de la mandíbula que no poseen depósitos de hierro (Zona hueso). En la siguiente figura se muestran los valores obtenidos, así como la media y la desviación típica de estos valores:

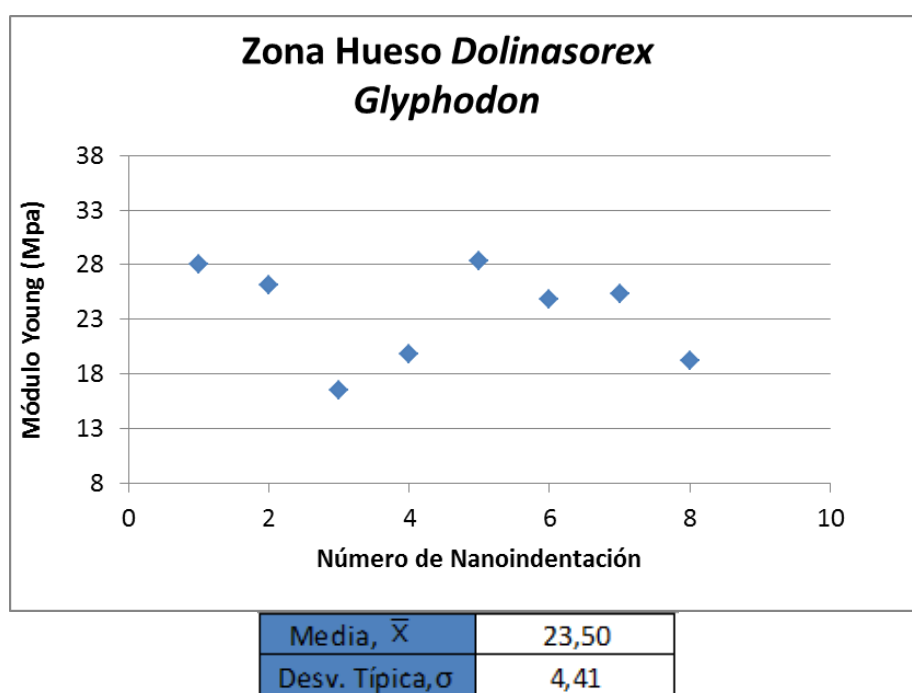


Figura 19. Valores del módulo de Young recogidos en la nanoindentación para el esmalte no pigmentado del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*, incluyendo el valor de la media y la desviación típica de la misma.

Para poder aplicar el criterio de Chauvenet se necesita conocer la diferencia absoluta entre la media de todas las muestras (fig. 19) y el valor de cada muestra (tabla 5). Estos valores aparecen en la siguiente tabla:

Número de muestra	$ \bar{X}-X_i $
1	4,50
2	2,60
3	7,00
4	3,70
5	4,80
6	1,30
7	1,80
8	4,30

Tabla 7. Diferencia absoluta entre el valor de la media total y el de cada muestra del módulo de Young para el esmalte no pigmentado del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

Se calcula seguidamente el valor de la desviación máxima, D_{max} . El valor de la desviación típica para esta muestra es $\sigma=4,41$ (figura 19) y el valor de la constante de Chauvenet para una muestra de $N=8$ es $k_C=1,87$ (tabla 3).

$$D_{max} = k_C \sigma = 1,87 * 4,41 = 8,25$$

De nuevo en ningún caso se cumple que $|\bar{X}-X_i| > k_C \sigma$, por lo que todos los datos son válidos y no se descarta ninguno. En consecuencia, la media calculada en la tabla 6 para el módulo de Young en las zonas sin depósitos de hierro no varía.

Por último, faltaría analizar los datos recogidos del módulo de Young para las zonas que poseen depósitos de hierro en el ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

De la misma manera que se ha hecho para el resto de casos, se muestra primeramente una figura con los datos recogidos, la media y la desviación típica de las muestras tomadas:

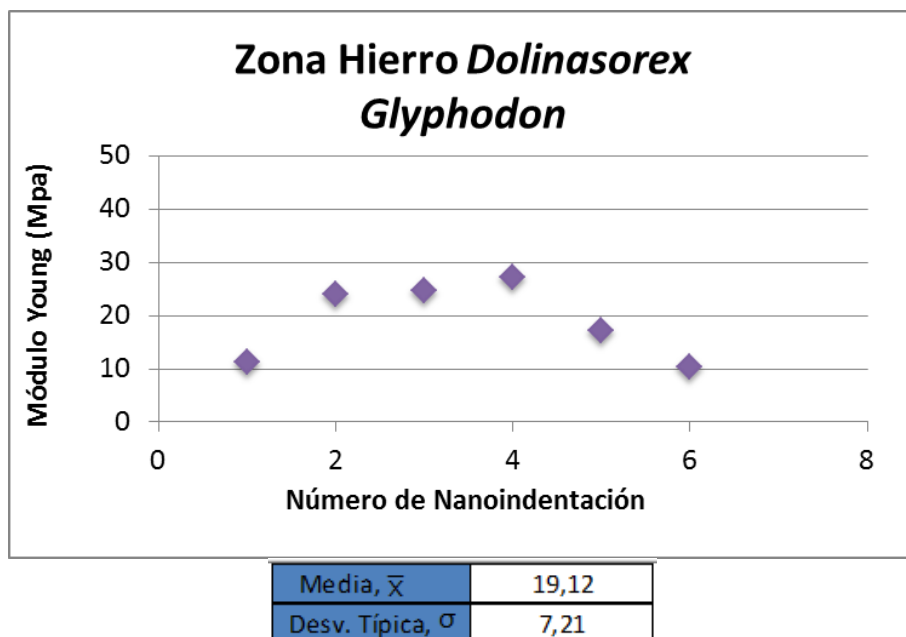


Figura 20. Valores del módulo de Young recogidos en la nanoindentación para el esmalte pigmentado del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*, incluyendo el valor de la media y la desviación típica de la misma.

Y de nuevo, es necesario conocer la diferencia entre la media (fig. 20) y el valor de cada muestra tomada (tabla 5) para poder aplicar el criterio de Chauvenet. Esta diferencia se muestra en la siguiente tabla:

Número de muestra	$ \bar{X}-X_i $
1	7,82
2	4,88
3	5,48
4	8,08
5	1,92
6	8,72

Figura 21. Diferencia absoluta entre el valor de la media total y el de cada muestra del módulo de Young para el esmalte pigmentado del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

Se debe hallar el valor de la desviación máxima, $D_{\text{máx}}$. El valor de la desviación típica ya ha sido calculado anteriormente como se muestra en la figura 20 ($\sigma = 7,21$). El valor de k_C se obtiene de la tabla 3, siendo en este caso para $N=6$, $k_C=1,73$. Por lo que la desviación máxima será:

$$D_{\text{max}} = k_C \sigma = 1,73 * 7,21 = 12,47$$

Como se puede observar, no se cumple en ninguna muestra el caso que $|\bar{X}-X_i| > k_C \sigma$, por lo que todos los datos son válidos. El valor medio del módulo de Young para la zona con depósitos de hierro del ejemplar *Dolinasorex glyphodon* tampoco variará.

6.3 Conclusiones sobre el análisis de los resultados del ensayo de nanoindentación

Esta es la tabla-resumen de los valores obtenidos finalmente para el **Módulo de Young (GPa)**:

	Blarina	Dolinasorex glyphodon
Zona Hueso (sin hierro)	31,85	23,50
Zona con hierro	41,84	19,12

Tabla 8. Resumen valores del módulo Young para ambos ejemplares.

Estos resultados no son coherentes ya que, en la mandíbula del ejemplar procedente de Atapuerca, el módulo de Young de los depósitos de hierro es menor que el de la zona sin ellos (al contrario de lo que sucede con el espécimen actual y también al contrario de lo esperado). Además los módulos de Young del *Dolinasorex glyphodon* son sensiblemente menores que los del ejemplar *Blarina*. Esto puede ser debido a que en la muestra del *Dolinasorex glyphodon*, pese a su gran estado de conservación, las propiedades mecánicas se han podido desvirtuar por el paso del tiempo.

Por todo esto, y previa discusión interna en el grupo de Investigación, para los cálculos posteriores se asignará los valores del módulo de Young del modelo actual (*Blarina*) a ambos modelos (*Blarina* y *Dolinasorex glyphodon*). Se ha formulado la hipótesis de que las propiedades mecánicas durante la vida del *Dolinasorex glyphodon* fueran muy próximas a las que posee el ejemplar actual (*Blarina*), basándonos en suponer que la microestructura de la dentina no ha variado sustancialmente en un lapso de tiempo, evolutivamente hablando, tan corto.

Una vez determinado el módulo de Young, el siguiente paso a realizar es la generación de los archivos de entrada para el programa Abaqus CAE, donde se realizarán todos los cálculos relativos a las tensiones que se generan en la mandíbula obteniendo así un conjunto de resultados objeto del estudio.

7. Cálculo tensional

Para poder proceder a realizar todos los cálculos necesarios, lo primero que se debe realizar es la exportación hacia el programa Abaqus CAE de los modelos creados en el programa I-Deas NX. Una de las grandes ventajas que posee el programa I-Deas NX es que permite que en el modelo exportado se conserven los grupos de elementos o de nodos (como los grupos nodales de las cargas o los grupos de las articulaciones, explicados anteriormente), posibilitando así que en el archivo generado a cada uno de estos grupos se les pueda asignar unas características específicas distintas a las del resto del modelo.

Se exportan archivos del tipo .inp, que son archivos de entrada para el programa Abaqus CAE. Abaqus CAE es un software que se utiliza para el modelado y análisis de componentes mecánicos mediante el método de Elementos Finitos.

Exportado el archivo de I-Deas NX con los grupos que nos interesen, y antes de ejecutarlo en Abaqus CAE, éste se debe modificar según el caso que se desee analizar.

En el archivo .inp generado, el primer paso es definir los materiales que van a aparecer en el modelo. En nuestro caso son dos, la zona de la mandíbula que posee depósitos de hierro, y las zonas que no lo poseen. Para caracterizar un material, y al estar en un problema elástico lineal e isótropo, basta con definir dos constantes para cada material: el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. El valor del módulo de Young ha sido determinado ya en el apartado anterior (*Determinación del Módulo de Young*). En la zona que no posee hierro su valor es de $E=31,85$ GPa, y en la zona con los depósitos de hierro es $E=41,84$ GPa, y estos valores son tanto para el modelo del espécimen *Blarina* como para el del *Dolinasorex glyphodon*. Para el coeficiente de Poisson se le ha asignado a ambos un valor de $\nu=0,3$. Se ha elegido este valor ya que el coeficiente de Poisson de la hidroxiapatita en humanos es $\nu=0,25$ [6], por lo que son muy similares. Un coeficiente de Poisson de $\nu=0,3$ es muy común en la mayoría de materiales. No se ha podido medir experimentalmente para las mandíbulas a estudio debido a la complejidad que supone el ensayo.

El siguiente paso es asignar estos materiales a los elementos que componen el modelo. Al haber creado dos grupos previamente en I-Deas NX formados por los elementos que contienen depósitos de hierro y los que no, se les asigna los materiales correspondientes.

Después se deben definir las condiciones de contorno según sea el caso. En ambos modelos se han creado los grupos de nodos que forman las articulaciones de la mandíbula. A estos grupos se les impone un desplazamiento nulo en los tres ejes del espacio, haciendo así que estén encastrados e impidiendo su movimiento. En el caso de la mandíbula del *Dolinasorex glyphodon* se debe imponer una condición de contorno adicional ya que solo posee la mitad inferior de la mandíbula. Esta condición consiste en imponer que el desplazamiento sea cero en el eje perpendicular al plano de simetría que se ha definido previamente. Así todos los nodos que forman este grupo no podrán desplazarse en este eje (en este caso es el eje X del modelo, Fig. 10) y se impondrá así la condición de simetría.

Por último falta definir las cargas, que variarán según el caso que se vaya a estudiar. Las regiones donde van a actuar han sido ya definidas previamente (como se ha explicado en el apartado *Refinado de malla y caracterización mecánica*), por lo que ahora faltaría asignar el módulo, dirección y sentido en el que actúan.

Se va a analizar en **primer lugar** el caso en el que las **cargas distribuidas** que actúan **sobre las crestas de los molares**:

Para todos los casos el módulo de la carga va a ser de 100N. Se ha escogido esta carga ya que no se dispone de la fuerza de mordedura de ninguno de los ejemplares, por lo que se ha seleccionado como una carga genérica. Una vez la fuerza de mordedura sea estimada de manera empírica, al ser un problema elástico lineal, si el módulo variase, las tensiones obtenidas variarían proporcionalmente. La dirección y el sentido de las cargas serán distintos según el modelo, ya que cada uno tiene sus propios ejes.

- Para el ejemplar *Dolinasorex glyphodon* se ha elegido la dirección Z (fig. 22), con sentido negativo para definir las cargas. Se han realizado cuatro casos distintos: el análisis tensional de cada molar por separado, y el caso en el que actúan las tres cargas distribuidas (presiones) al mismo tiempo (Carga 1, 2 y 3). El módulo ha de ser de 100N, pero al haber impuesto la condición de simetría porque sólo se posee el modelo de la mitad de la mandíbula inferior, el módulo introducido será la mitad, 50N. Se consigue así un caso análogo al que sucedería si la mandíbula completa mordiera con 100N en cada caso. En el archivo .inp que se va a ejecutar en Abaqus CAE se debe introducir el módulo de la carga por nodo, así que simplemente hay que dividir 50N entre el número de nodos que formen el grupo a analizar.

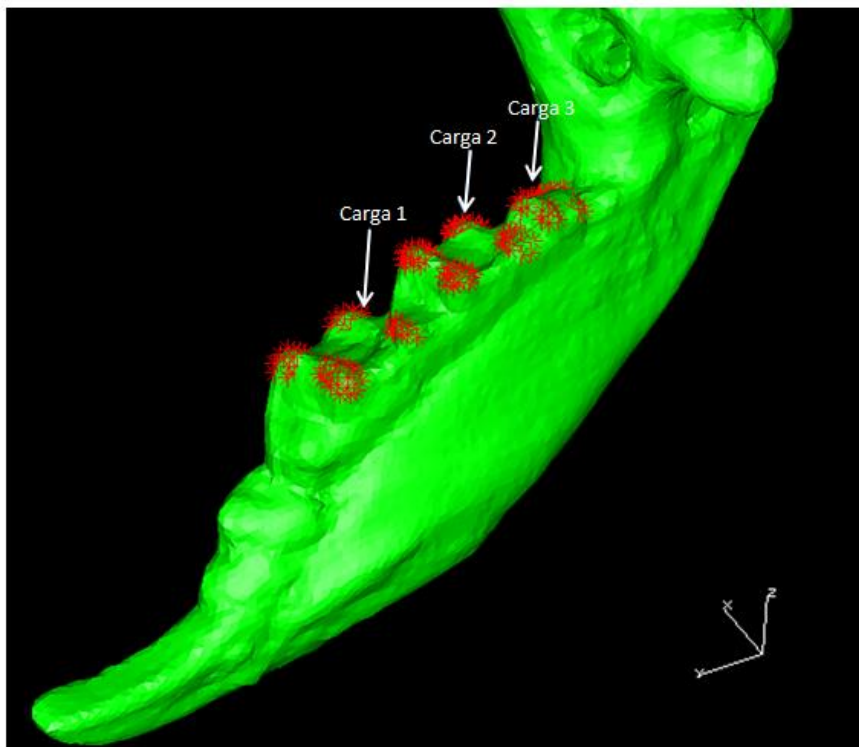


Figura 22. Representación de los vectores de carga sobre los molares del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

- Para el modelo de la mandíbula del ejemplar **Blarina** se ha seleccionado el eje Y para la dirección sobre las que van a ir las cargas distribuidas, y en su sentido negativo (Fig. 23). Al igual que en el caso anterior, el módulo de la carga va a ser de 100N, y se volverán a analizar los cuatro casos (cada carga sobre su correspondiente molar y el caso en el que actúen las tres cargas distribuidas al mismo tiempo, Fig. 24). En este caso al tener la mandíbula completa, la carga será directamente de 100N, y no es necesario tener que dividirla. Como se ha explicado anteriormente, en el archivo .inp hay que introducir el valor del módulo de la carga por nodo, así que se divide 100N entre el número de nodos que forman cada grupo a analizar.

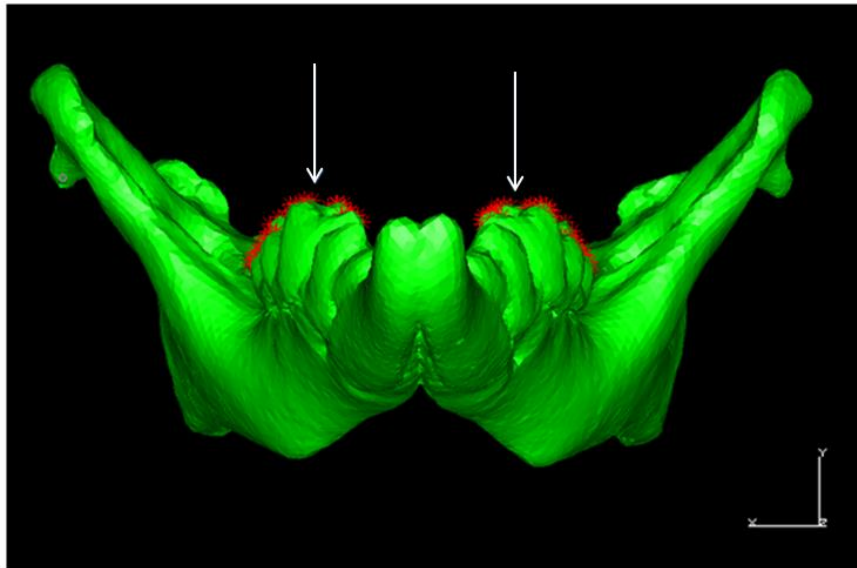


Figura 23. Representación de los vectores de carga sobre los molares del ejemplar *Blarina* (1).

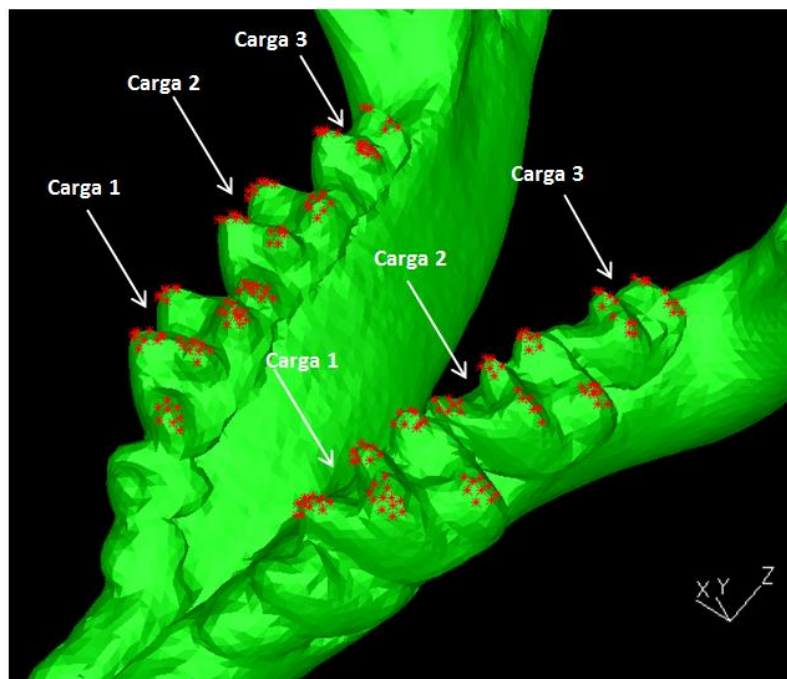


Figura 24. Representación de los vectores de carga sobre los molares del ejemplar *Blarina* (2).

El **segundo caso** a analizar es cuando las **cargas distribuidas** son producidas en la **punta de los incisivos** debido a la penetración de éstos sobre otra superficie.

De nuevo el módulo de la carga distribuida es de 100N para ambas mandíbulas, siguiendo el razonamiento explicado para el caso de las cargas sobre las crestas de los molares.

Sobre el modelo se ha estimado una dirección óptima en la que el incisivo penetraría de forma favorable para ser capaz de inocular el veneno sobre su víctima. Así, para analizar el caso de las cargas sobre el incisivo, se ha elegido esta dirección para el vector que se introduce en el archivo .inp. Esta dirección (y también el sentido) estará expresado en las coordenadas propias que posee cada modelo de las mandíbulas.

Se amplía la explicación de cómo introducir estas cargas en el archivo .inp en el **Anexo 1**.

En las figuras 25 y 26 (*Dolinasorex glyphodon* y *Blarina* respectivamente) se puede observar las cargas que se aplican en las puntas de los incisivos. Al igual que en el caso de los molares, en el modelo del *Dolinasorex glyphodon*, la carga será de 50N (la mitad de 100N). De nuevo hay que introducir la carga por nodo, por lo que se divide 50N entre el número de nodos que forman el grupo donde se aplica la carga para el caso del *Dolinasorex glyphodon*, y 100N entre el número de nodos para el caso del ejemplar *Blarina*.

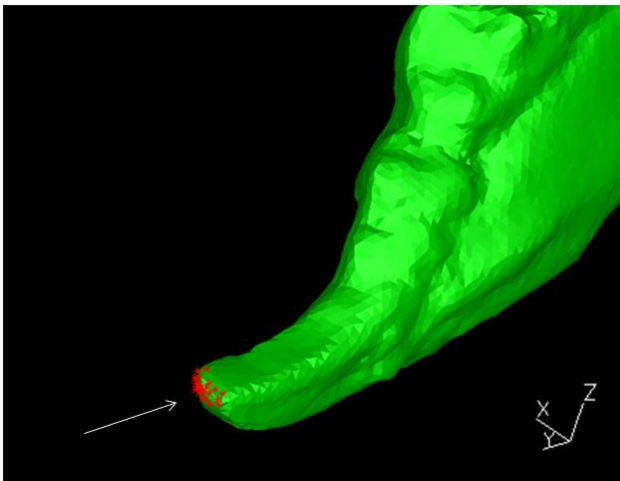


Figura 25. Representación de los vectores de carga sobre los incisivos del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*

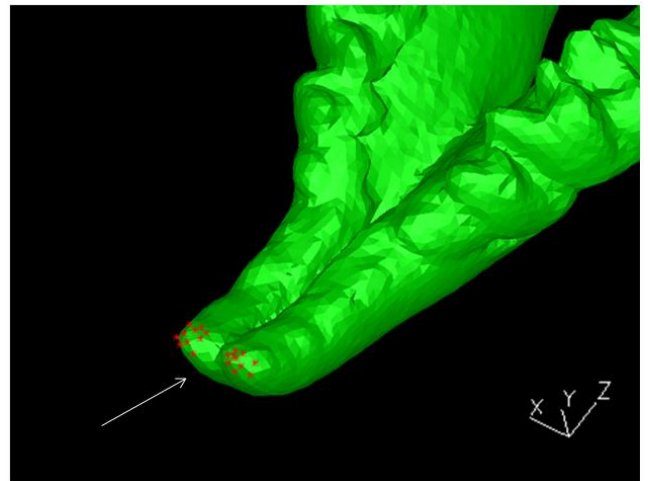


Figura 26. Representación de los vectores de carga sobre los incisivos del ejemplar *Blarina*.

Una vez completado el archivo .inp, se procede a ejecutar éste en el programa Abaqus CAE, que realizará la resolución de cada caso y dónde se obtendrán las tensiones resultantes en las mandíbulas.

8. Resultados tensionales

Cada caso está definido en un archivo .inp diferente, por lo que cada uno de ellos se ejecuta por separado. A continuación se muestran los casos más significativos, donde se pueden observar las tensiones de von Mises generadas en ambas mandíbulas a modo comparativo. En el **Anexo II** se detallan el resto de casos.

8.1 Tensiones debido a las cargas distribuidas en los molares

El **primer caso** que se muestra es cuando actúan las cargas sobre los seis molares (Carga 1, 2 y 3 anteriormente definidas) al mismo tiempo sobre el modelo del espécimen **Blarina**. Se ha seleccionado este caso debido a que es el que se producirá de manera más habitual cuando se produce la acción masticatoria y se producen cargas distribuidas en todos los molares.

El estado tensional obtenido en Abaqus CAE para este caso es:

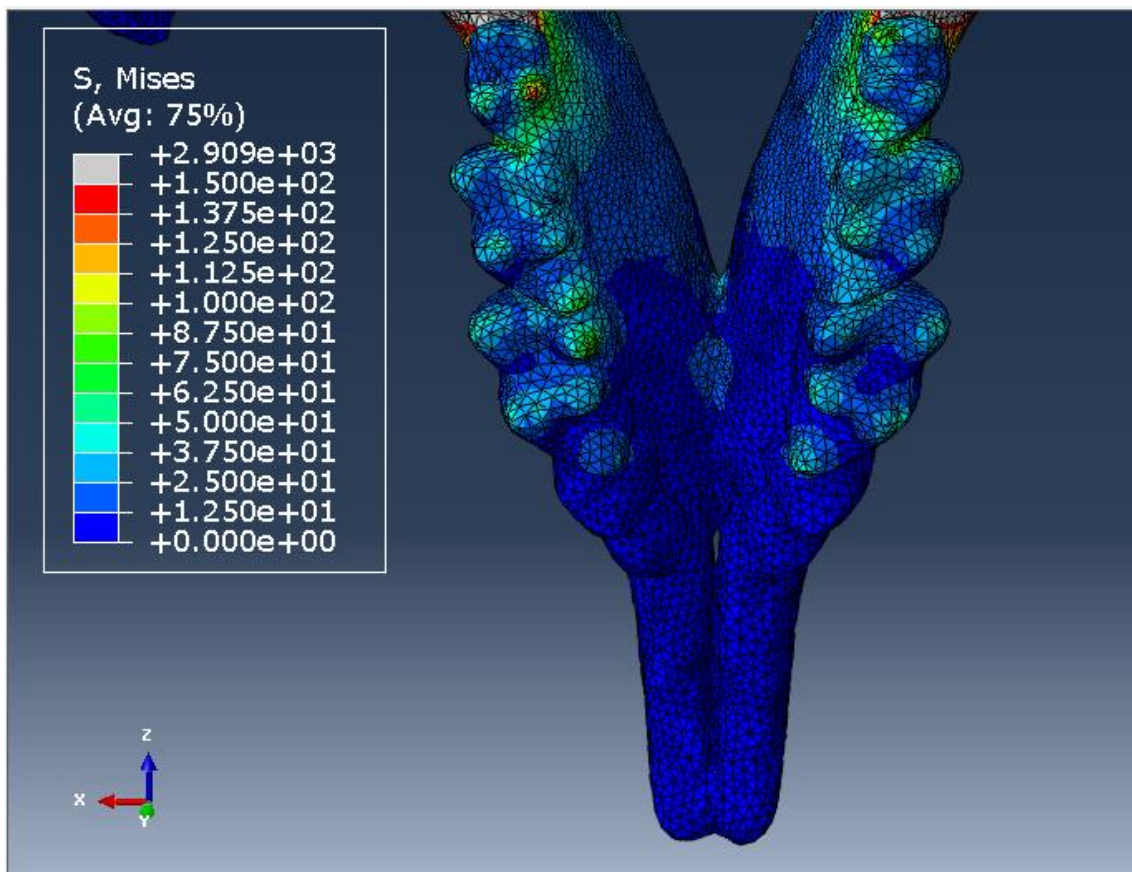


Figura 27. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Blarina* cuando actúa una carga de 100N sobre sus seis molares (1).

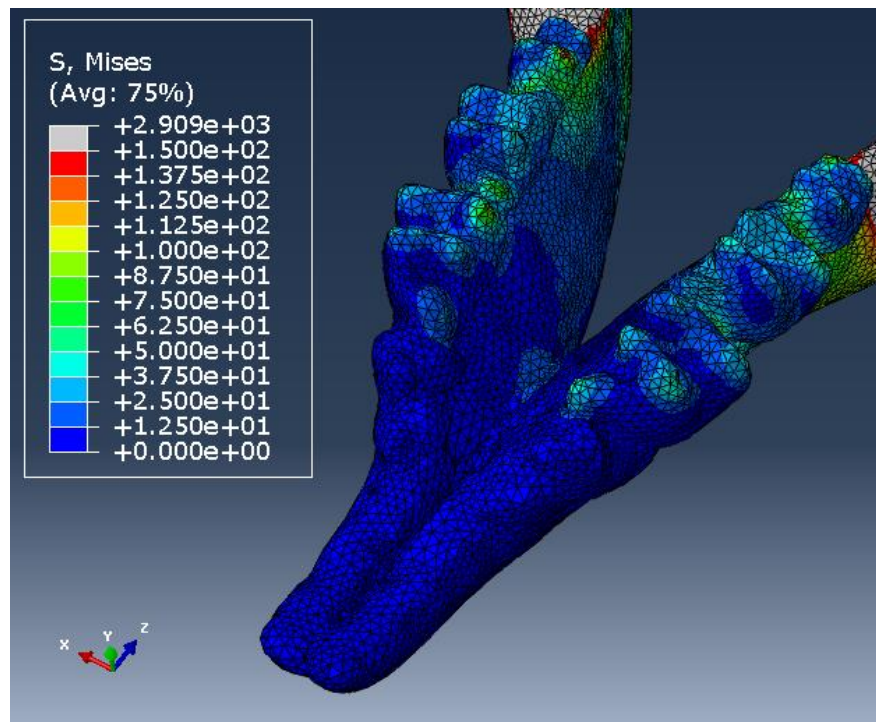


Figura 28. Estado tensional de la mandíbula del modelo Blarina cuando actúa una carga de 100N sobre sus seis molares (2).

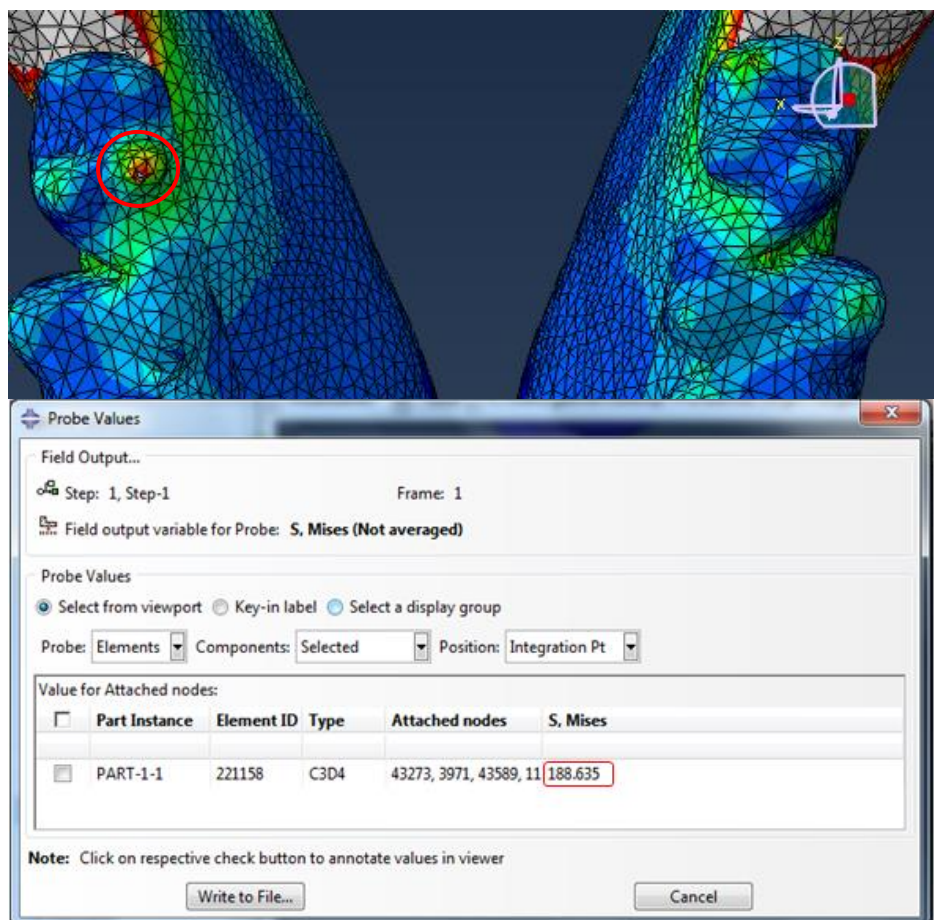


Figura 29. Elemento del modelo *Blarina* donde se registra la mayor tensión de von Mises cuando actúa una carga de 100N sobre sus seis molares.

El análisis de los resultados solo se centra en las tensiones generadas en los molares, ya que se está estudiando la influencia de los depósitos de hierro en la dentadura (más concretamente en el esmalte). Como se puede observar (Fig. 27 y Fig. 28) las tensiones son mayores en las puntas de los molares, en especial en los molares M3 debido a que éstas son concentradores de tensiones dada su morfología.

La tensión de von Mises máxima se encuentra en la zona del molar señalado en la Fig. 29 y esta tensión es de 188.64 MPa. Una vez se obtenga en estudios futuros la fuerza de mordedura de este ejemplar, se podrá obtener una primera aproximación de la tensión máxima que se generará y donde, ya que las tensiones producidas son proporcionales a las fuerzas que las provocan dentro de la hipótesis elástico lineal.

El segundo caso pertenece al modelo *Dolinasorex glyphodon*, donde de nuevo se muestra el caso en el que actúan las cargas distribuidas sobre los molares 1, 2 y 3, ya que como se ha considerado para el caso del ejemplar *Blarina*, el caso más común durante la acción masticatoria del animal es que se produzcan las presiones en todos los molares al mismo tiempo.

El estado tensional tras la aplicación de las cargas distribuidas es:

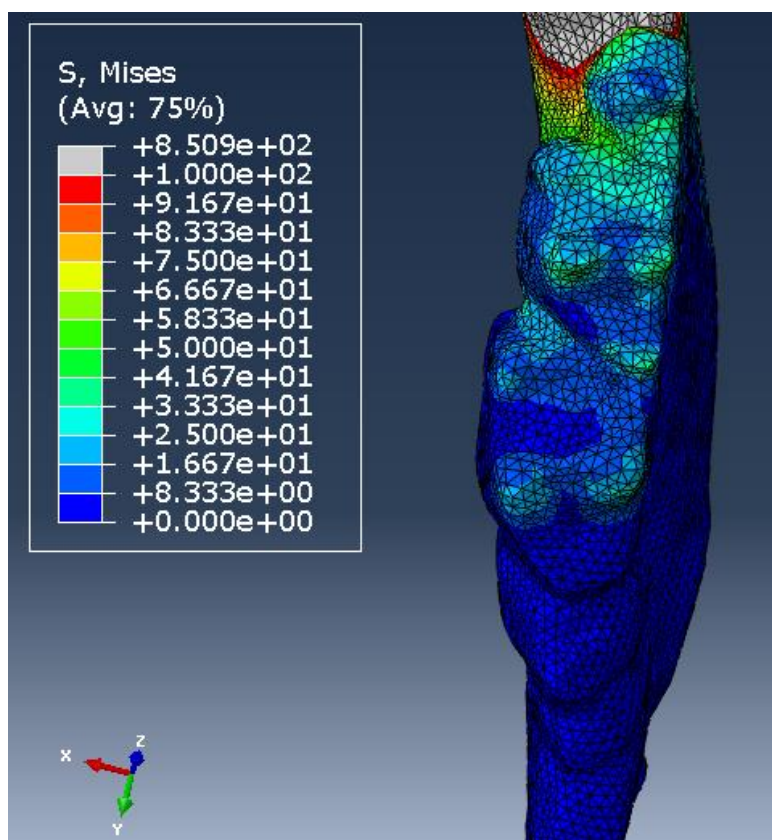


Figura 30. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Dolinasorex glyphodon* cuando actúa una carga de 50N sobre sus tres molares (1).

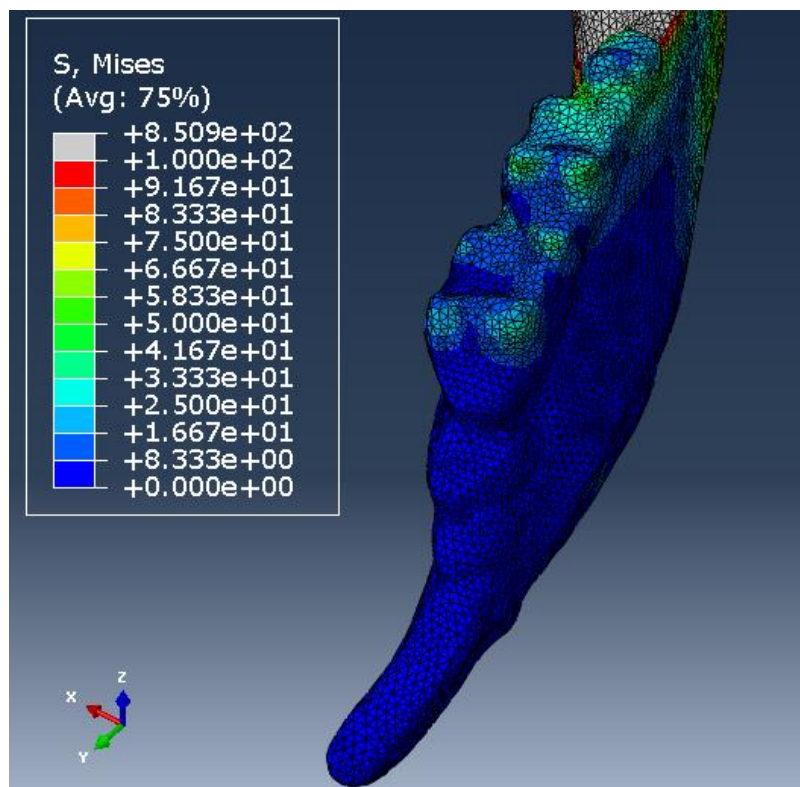


Figura 31. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Dolinasorex glyphodon* cuando actúa una carga de 50N sobre sus tres molares (2).

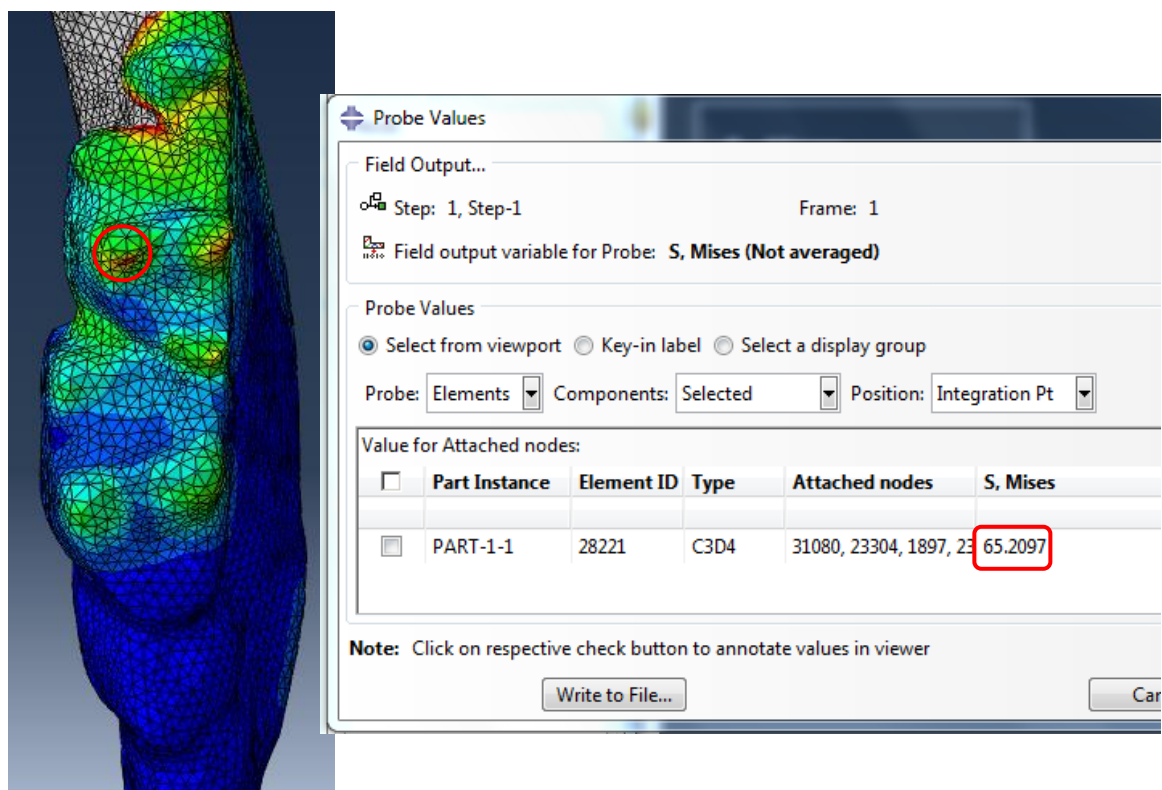


Figura 32. Elemento del modelo *Dolinasorex glyphodon* donde se registra la mayor tensión de von Mises cuando actúa una carga de 50N sobre sus tres molares.

De nuevo el estudio se centra solamente en las tensiones que se producen en los molares, ya que el estudio está enfocado en los depósitos de hierro que aparecen en la dentadura.

La tensión máxima de von Mises que se genera se localiza en el segundo molar, tal y como se ve en la figura 32 y su valor es de 65,21 MPa. De nuevo, dentro de la hipótesis elástico lineal, una vez se estime con exactitud la fuerza de mordedura que poseía el ejemplar *Dolinasorex glyphodon*, se podrá hacer una estimación de la tensión máxima que se produciría y en qué zona, ya que las tensiones son proporcionales a las cargas que las producen.

Del estudio tensional de las cargas distribuidas de manera superficial sobre los molares se puede concluir que éstas no son la razón principal de que existan depósitos de hierro. Su presencia contribuye a aumentar la dureza y a soportar tensiones más altas que el esmalte sin pigmentar, pero en este primer estudio no parece justificar que el esmalte pigmentado haya sido la respuesta evolutiva de estos mamíferos para soportar este tipo de cargas.

El siguiente caso que se va a analizar es cuando se producen cargas distribuidas en las puntas de los incisivos de ambas mandíbulas. Este caso es más crítico, ya que la fractura de los incisivos sería incompatible con la supervivencia de ambos ejemplares. Esto se debe a la necesidad de inocular las toxinas a través de sus incisivos para poder posteriormente alimentarse de la víctima.

8.2 Tensiones debido a las cargas en los incisivos

En este apartado se van a tratar las tensiones que se generan cuando la mordedura es producida por los **incisivos** para que la musaraña pueda inyectar el veneno a través de éstos.

En **primer lugar** se muestran los resultados obtenidos para la mandíbula del ejemplar **Blarina**:

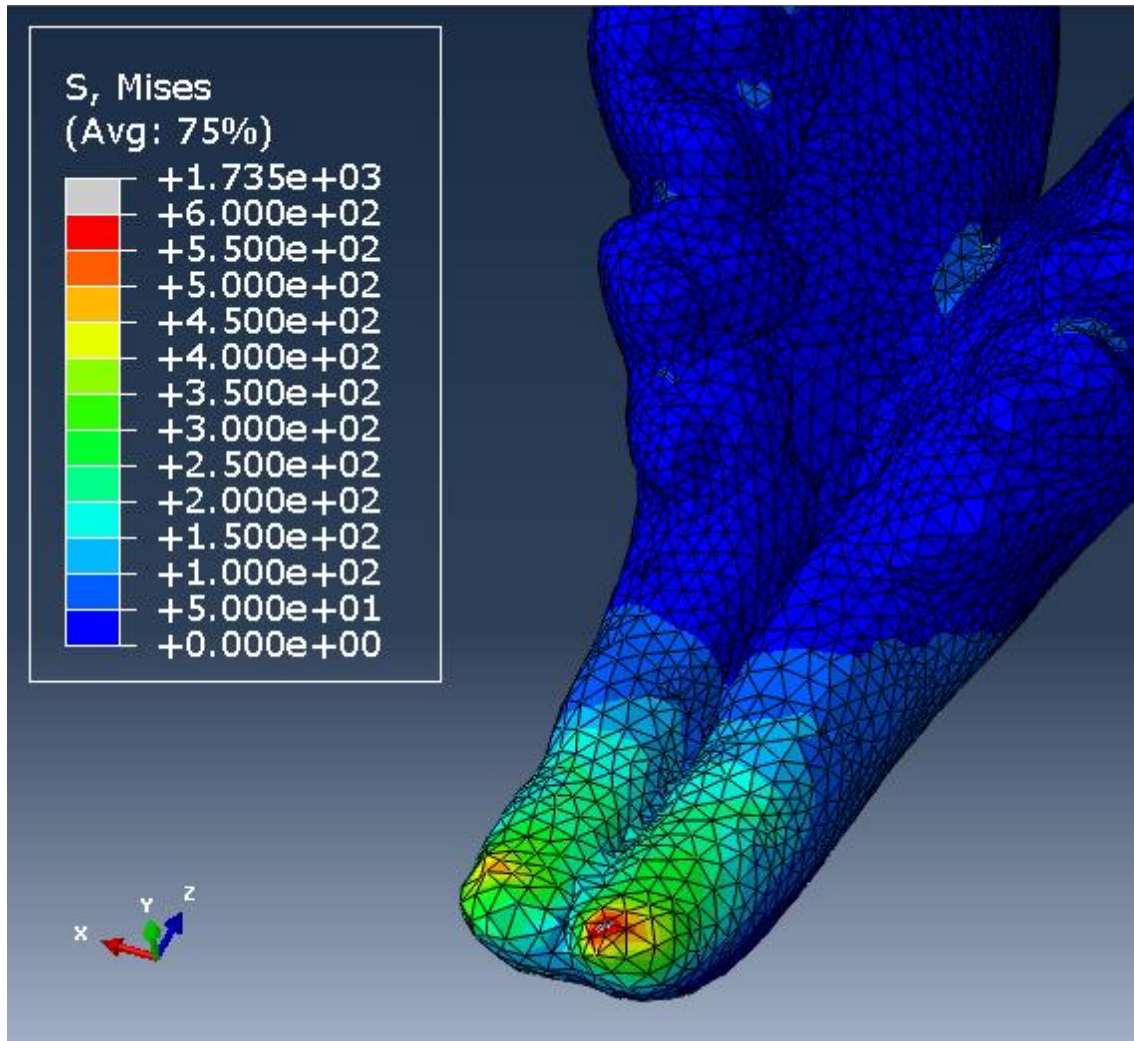


Figura 33. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Blarina* cuando actúa una carga de 100N sobre sus incisivos.

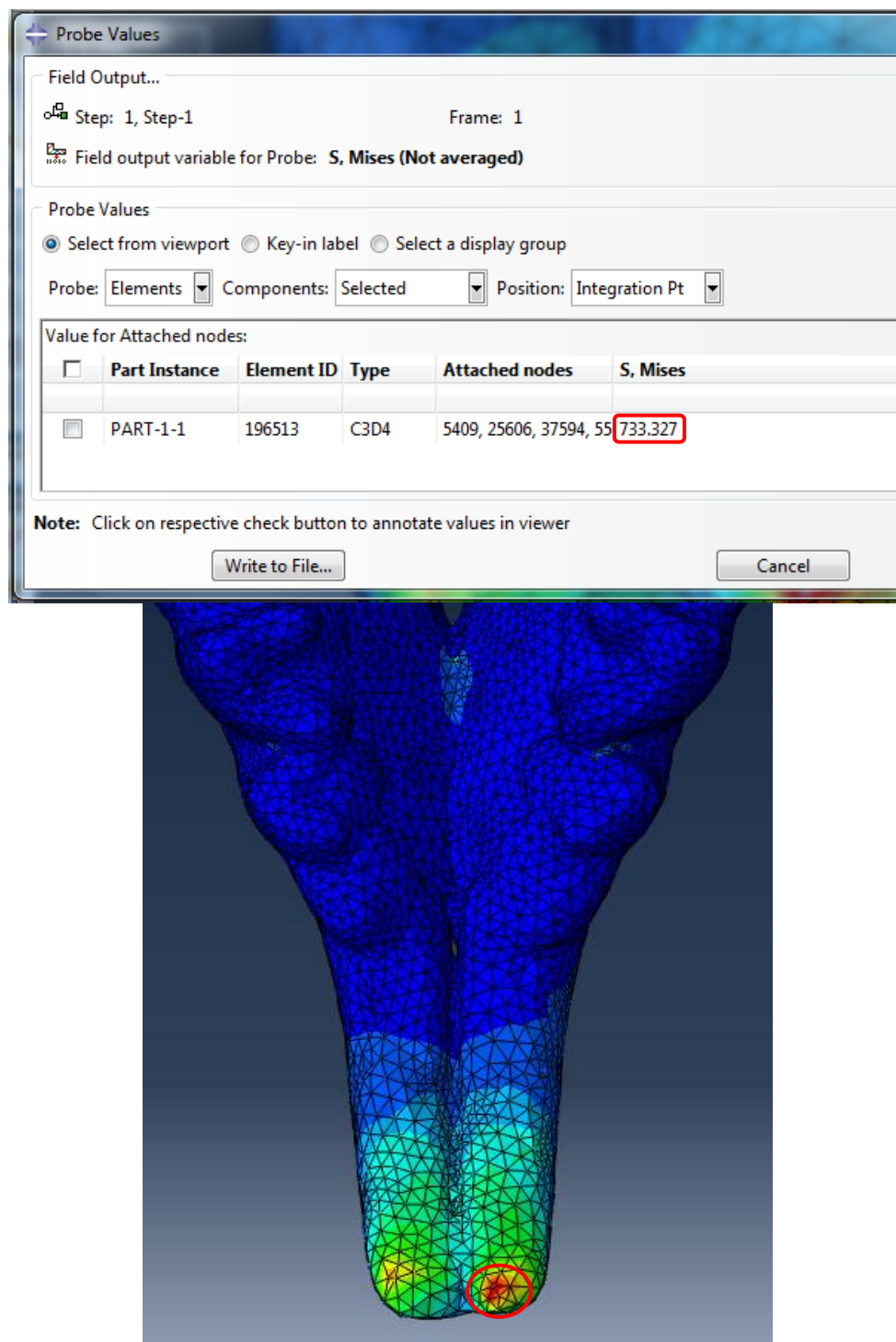


Figura 34. Elemento del modelo *Blarina* donde se registra la mayor tensión de von Mises cuando actúa una carga de 100N sobre sus incisivos.

La tensión máxima de von Mises que se genera aparece señalada en la figura 34 y su valor es de 733,33 MPa.

Se muestran en segundo caso las tensiones generadas en la mandíbula del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*:

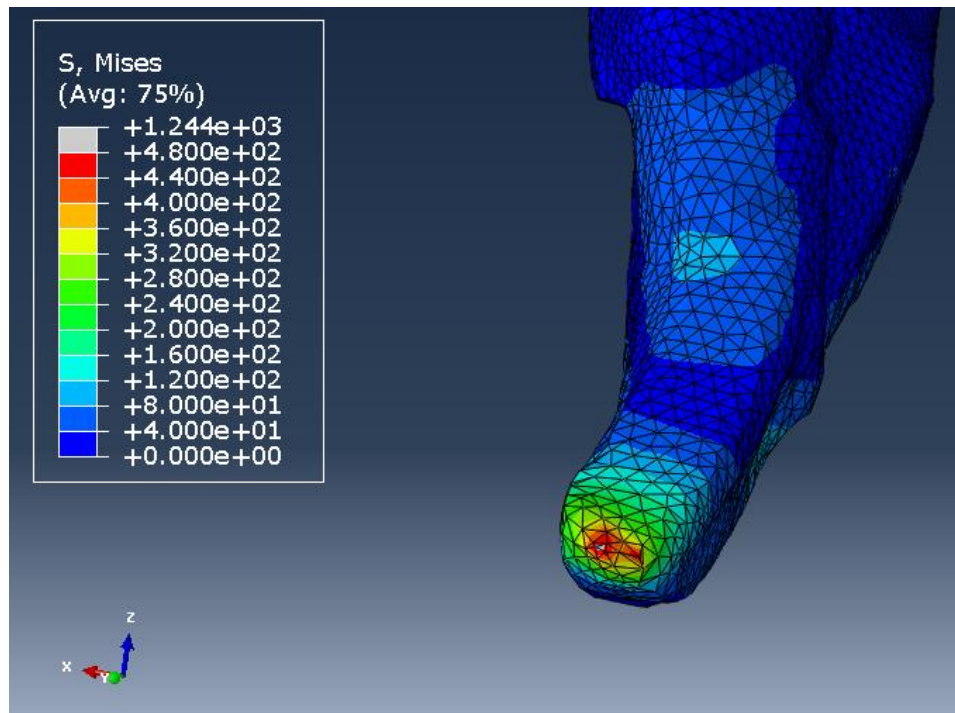


Figura 35. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Dolinasorex glyphodon* cuando actúa una carga de 50N sobre el incisivo.

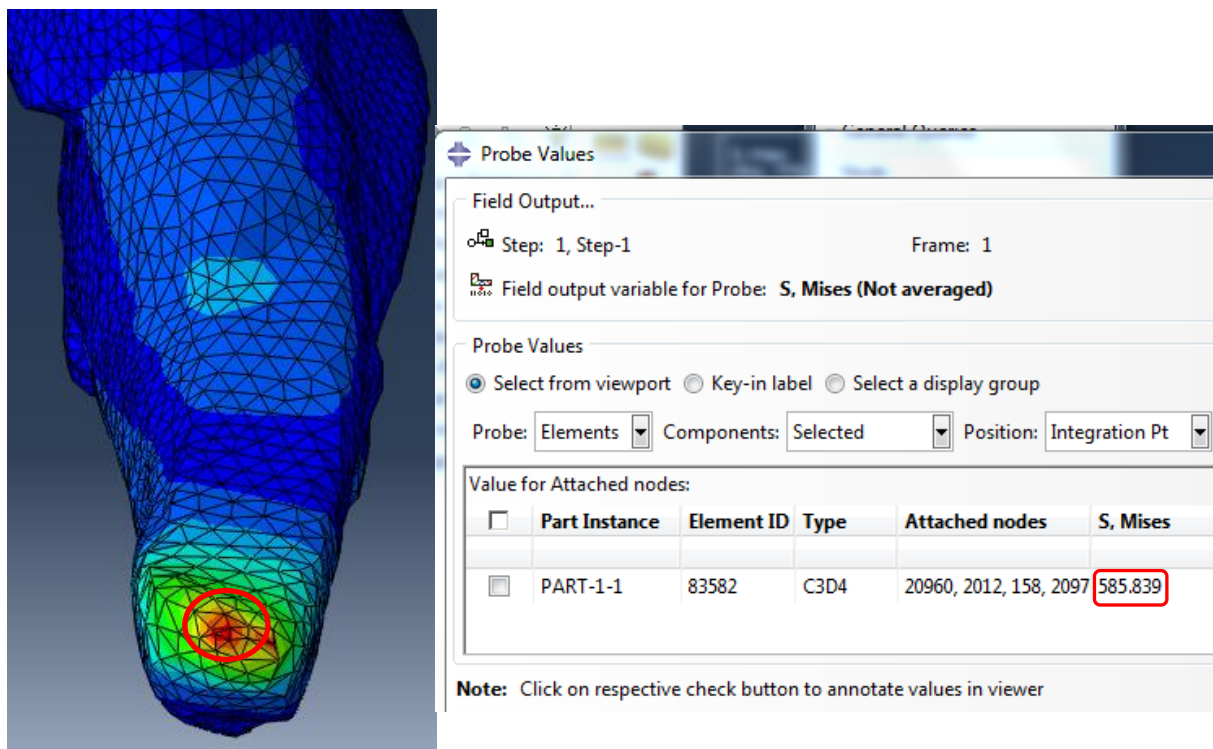


Figura 36. Elemento del modelo *Dolinasorex glyphodon* donde se registra la mayor tensión de von Mises cuando actúa una carga de 50N sobre el incisivo.

La tensión máxima de von Mises generada en el incisivo (fig. 36) es de 585,84 MPa.

Una vez se obtienen las tensiones máximas en los incisivos debidos a las cargas distribuidas en la punta de éstos, se va a proceder a hacer una estimación de la fuerza de mordedura tanto del ejemplar *Dolinasorex glyphodon* como del ejemplar *Blarina*, haciendo una analogía con la mordedura de los seres humanos. Estimadas estas fuerzas, se calculará la tensión máxima de von Mises que producirían, ya que se dispone de las tensiones máximas para una carga distribuida de 100N obtenidas en este apartado y las tensiones son proporcionales a las cargas que las producen. También se comprobará si estas tensiones producirían la rotura del incisivo.

8.3 Estimación de la fuerza de mordedura

Determinar la fuerza de mordedura del ejemplar *Dolinasorex glyphodon* es físicamente imposible, ya que dejó de existir hace miles de años, por lo que se ha optado por realizar una estimación de ésta. Se trata de buscar una analogía con la mordedura humana, ya que ésta está ampliamente estudiada y se pueden encontrar gran cantidad de artículos e información sobre ella. Para realizar esta analogía y poder hallar un valor razonable de esta fuerza, se va a utilizar el Teorema π de Vaschy-Buckingham.

Este teorema establece que si se sabe que un proceso físico es gobernado por una relación dimensionalmente homogénea que comprende a n variables dimensionales, y dichas variables se expresan en k cantidades físicas dimensionalmente independientes, entonces la ecuación original se puede escribir equivalentemente con una ecuación de $n-k$ números adimensionales contruidos con las variables originales.

Si se tiene una ecuación física tal que:

$$f(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0$$

Siendo q_i las n variables físicas que intervienen y que se expresan en k unidades físicas independientes. Esta ecuación se puede reescribir como:

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-k}) = 0$$

Donde π_i son los parámetros adimensionales contruidos con las variables originales.

Para el caso a estudio, se han determinado cinco variables ($n=5$) que pueden determinar el proceso de la mordedura. Estas cinco variables son:

- R_m , distancia del incisivo al centro instantáneo de rotación de la mandíbula durante la mordedura.
- v , velocidad a la que se produce la mordedura
- F , fuerza de la mordedura
- σ_e , dureza del diente (esmalte)
- H_D , altura del diente

Estas variables se van a expresar en tres unidades físicas independientes ($k=3$), que son: Longitud (L), Tiempo (T) y Masa (M). Así serán **dos** ($n-k=5-3=2$) los número adimensionales que se obtendrán para este caso, π_1 y π_2 .

Por lo que obtendremos según lo explicado anteriormente:

$$f(R_m, v, F, \sigma_e, H_D) = 0$$

Y se buscará una función que cumpla:

$$F(\pi_1, \pi_2) = 0$$

Para poder obtener estos números adimensionales se deben elegir tres variables de las cinco que sean independientes y lo más sencillas posibles. Por lo que se han determinado R_m , v y F como estas tres variables. El primer número adimensional se obtendrá con estas tres variables y una de las otras dos restantes, en este caso σ_e . El segundo número adimensional se obtendrá de nuevo con las tres variables principales y la variable que falta, H_D . Los números adimensionales quedarán de la siguiente forma:

$$\pi_1 = R_m^a v^b F^c \sigma_e$$

$$\pi_2 = R_m^a v^b F^c H_D$$

En esta tabla se expresan las cinco variables en función de las tres variables independientes que se han definido anteriormente: Longitud, Tiempo y Masa.

	L	T	M
R_m	1	0	0
v	1	-1	0
F	1	-2	1
σ_e	-1	-2	1
H_D	1	0	0

Tabla 9. Tabla donde se muestran las cinco variables en función de Longitud, Tiempo y Masa.

Para obtener el primer número adimensional, π_1 , se debe cumplir la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} L^0 T^0 M^0 &= (R_m^a v^b F^c \sigma_e) = (L)^a (LT^{-1})^b (LT^{-2}M)^c (L^{-1}T^{-2}M) = \\ &= L^{a+b+c-1} T^{-b-2c-2} M^{c+1} \end{aligned}$$

De aquí se obtienen un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas:

$$\begin{cases} a + b + c - 1 = 0 \\ -b - 2c - 2 = 0 \\ c + 1 = 0 \end{cases}$$

Y a partir de este sistema se obtienen las 3 incógnitas:

$$a = 2$$

$$b = 0$$

$$c = -1$$

Por lo que el primer número adimensional obtenido es:

$$\pi_1 = \frac{R_m^2 \sigma_e}{F}$$

Para obtener el segundo número adimensional, π_2 , se realiza de idéntica manera, pero la cuarta variable será H_D . Se deberá cumplir así la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} L^0 T^0 M^0 &= R_m^a v^b F^c H_D = (L)^a (LT^{-1})^b (LT^{-2}M)^c L \\ &= L^{a+b+c+1} T^{-b-2c} M^c \end{aligned}$$

Y de aquí se vuelve a obtener otro sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas:

$$\begin{cases} a + b + c + 1 = 0 \\ -b - 2c = 0 \\ c = 0 \end{cases}$$

Las tres incógnitas valdrán entonces:

$$a = -1$$

$$b = 0$$

$$c = 0$$

Y así el segundo número adimensional será:

$$\pi_2 = \frac{H_D}{R_m}$$

La variable que interesa sólo aparece en el primer número adimensional, por lo que se debe obtener el valor de R_m y σ_e para la mandíbula humana y la mandíbula de la musaraña, y el valor de la fuerza de una mordida humana estándar. Quedaría así como única incógnita la fuerza de mordedura de la musaraña.

$$\pi_1 = \left[\frac{R_m^2 \sigma_e}{F} \right]_{\text{musaraña}} = \left[\frac{R_m^2 \sigma_e}{F} \right]_{\text{humano}} \quad (\text{ec.1})$$

La dureza del esmalte (pigmentado) del *Dolinasorex glyphodon* se ha podido medir gracias a la nanoindentación (apartado *Determinación del Módulo de Young*). De la tabla 6 se obtiene la media de la dureza para la zona pigmentada, y a modo comparativo se toma también la media de la dureza de la zona pigmentada en la musaraña actual (*Blarina*) de la tabla 2.

- La dureza media de la zona pigmentada del *Dolinasorex glyphodon* es $\sigma_e=0,48 \text{ GPa}$
- La dureza media de la zona pigmentada del *Blarina* es $\sigma_e=1,59 \text{ GPa}$

Como se puede observar, la dureza de la zona pigmentada del espécimen actual es mayor que la que presenta el ejemplar procedente de Atapuerca. Por ello se realiza la misma hipótesis que en el módulo de Young, y el valor de la dureza que más se podría aproximar al que hubiese presentado el ejemplar *Dolinasorex glyphodon* en vida sería más similar al del ejemplar actual, *Blarina*, que el que se ha obtenido en el ensayo.

Debido a la dificultad de realizar este tipo de ensayos, el valor de la dureza para el esmalte pigmentado que se va a utilizar es el valor que aparece en el artículo de la revista Science por Gordon, Joester *et al* [1]. El valor que aparece en el artículo para el esmalte pigmentado para la dureza es de 5 a 6 GPa. El orden de magnitud en la dureza obtenida mediante los ensayos es el mismo, pero se utilizará el valor del artículo debido a que es más fiable. Debido a que se va a utilizar este valor, ya no es necesario hacer un descarte de posibles valores erróneos durante la medición como sí que se ha realizado en el módulo de Young. También se ha optado por el valor reseñado en el artículo debido a que la dureza media que presenta el esmalte pigmentado en los ensayos es menor que el valor medio de la dureza de la zona no pigmentada en ambos especímenes, al contrario de lo que sucede realmente.

Por tanto el valor para la dureza del esmalte en la musaraña, para el desarrollo del Teorema π de Vaschy-Buckingham es $\sigma_e=5,5$ GPa.

La siguiente variable a determinar es la distancia entre el incisivo y el centro instantáneo de rotación en el ejemplar *Dolinasorex glyphodon* durante la mordedura (R_m). Para determinarla se ha estimado un centro instantáneo de rotación de la mandíbula y se ha medido sobre el modelo de I-Deas NX la distancia que existe entre este centro instantáneo de rotación y la punta del incisivo (Figura 37).

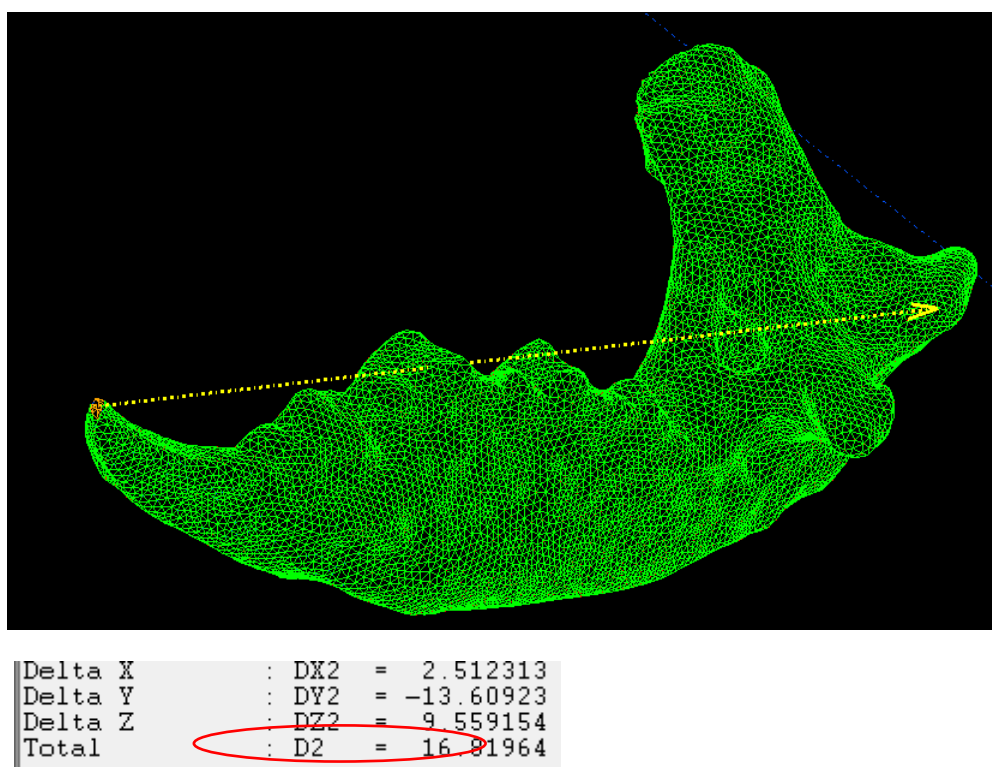


Figura 37. Captura del programa I-Deas NX donde se muestra la medida realizada para la variable R_m para el ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

La distancia obtenida es de 16,82 mm. Así el valor de la variable será $R_m = 16,82$ mm.

La siguiente variable a determinar es la dureza del esmalte de una persona. Para este parámetro nos basaremos en el Trabajo escrito por Camilo Alberto Rivera Velázquez [7] que trata sobre las propiedades mecánicas del esmalte dental. Se toma un valor de dureza para el esmalte de una persona adulta de 3,5 GPa.

Así la variable será $\sigma_e = 3,5$ GPa para personas.

Para la distancia que existe entre el centro instantáneo de rotación de la mandíbula durante la mordedura y los incisivos se ha tomado el valor promedio de 12 cm.

La variable para personas será $R_m = 12$ cm.

Por último se debe obtener un valor de fuerza en una mordida de persona estándar. La fuerza masticatoria máxima funcional de una persona oscila entre los 60 y 70 kgf [8]. Queda así determinado el valor de la última variable necesaria para poder obtener la fuerza de mordedura de la musaraña, $F = 70$ kgf.

A modo resumen se muestran a continuación el valor de las variables que se van a utilizar para la resolución del Teorema π de Vaschy-Buckingham:

- σ_e musaraña = 5,5 GPa
- R_m musaraña = 16,82 mm $\approx 1,7$ cm
- σ_e humano = 3,5 GPa
- R_m humano = 12 cm
- $F = 70$ kgf

Se obtiene el valor de π_1 a partir de las variables obtenidas para las personas:

$$\pi_1 = \left[\frac{R_m^2 \sigma_e}{F} \right]_{humano} = \frac{(12 \text{ cm})^2 * 3,5 \text{ GPa}}{70 \text{ kgf}} = 7,2$$

Siendo coherentes con las unidades utilizadas para obtener el valor de π_1 y manteniendo la igualdad de la ecuación 1, se obtiene ahora el valor de la fuerza de mordida del *Dolinasorex glyphodon*:

$$\pi_1 = 7,2 = \left[\frac{R_m^2 \sigma_e}{F} \right]_{musaraña} = \frac{(1,7 \text{ cm})^2 * 5,5 \text{ GPa}}{F \text{ (kgf)}}$$

$$F_{musaraña} = 2,2 \text{ kgf} = 21,6 \text{ N}$$

La fuerza estimada de mordedura del *Dolinasorex glyphodon* es de 21,6N. Esta carga es para la mandíbula completa, pero al disponer solamente de la mitad inferior de la mandíbula, debemos dividir esta carga entre dos a la hora de definir el archivo .inp. La carga será entonces de 10,8N.

Según lo explicado al comienzo de este capítulo, una vez obtenidas las tensiones que se generan en la mandíbula para una carga genérica de 50N (la mitad de 100N ya que solo se posee el modelo de la mitad de la mandíbula inferior), para otro valor de carga estas tensiones serán proporcionales a ella.

$$\sigma = \frac{F}{50\text{ N}} * \sigma_{50\text{ N}}$$

Así si se desea obtener, por ejemplo, la tensión máxima generada para la fuerza estimada de 10,8N para el *Dolinasorex glyphodon*, simplemente se debe aplicar esta proporcionalidad:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F}{50\text{ N}} * \sigma_{\text{máx}-50\text{ N}}$$

El valor de la tensión máxima de von Mises que se genera en el incisivo para el *Dolinasorex glyphodon* es 585,84 MPa, (fig. 36) aplicada la carga genérica de 50N.

Aplicando la ecuación:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{10,8\text{ N}}{50\text{ N}} * 585,84\text{ MPa} = 126,3\text{ MPa}$$

La tensión máxima de von Mises que se generaría en el incisivo del *Dolinasorex glyphodon* para la fuerza de mordedura estimada según el Teorema π de Vaschy-Buckingham es 126,3 MPa.

Se realiza la comprobación sustituyendo la carga sobre el incisivo de 50N en el modelo del *Dolinasorex glyphodon* por la carga de 10,8N. A continuación se comprueba que sobre el mismo elemento (cuya ID es 83582) sobre el que se registraba la tensión máxima en el caso de la carga genérica, su tensión es 126,3 MPa con la nueva carga. En la siguiente imagen se muestra una captura del valor de la tensión recogido en este elemento, y como se puede ver, queda comprobada la linealidad y el resultado coincide con el estimado teóricamente.

Part Instance	Element ID	Type	Attached nodes	S, Mises
PART-1-1	83582	C3D4	20960, 2012, 158, 2097	126.299

Figura 38. Captura que muestra el valor de la tensión de von Mises en el elemento donde se registra la mayor tensión en el modelo *Dolinasorex glyphodon* con la nueva carga estimada.

Siguiendo el mismo procedimiento para la estimación de la fuerza de mordedura del *Dolinasorex glyphodon* se va a estimar ahora la fuerza de mordedura del ejemplar *Blarina*.

Se realiza la misma analogía entre la mordedura de una persona y la de la musaraña a través del Teorema π de Vaschy-Buckingham.

Las variables R_m , F y σ_e para las personas siguen teniendo el mismo valor que se ha utilizado para el caso anterior.

Siguiendo el mismo razonamiento explicado para el *Dolinasorex glyphodon*, se va dar un valor de $\sigma_e=5,5$ GPa para la dureza del esmalte pigmentado para el ejemplar *Blarina*.

Faltaría tan solo la distancia que existe entre el centro instantáneo de rotación y los incisivos. Para ello se vuelve a medir la distancia en el modelo de la mandíbula en el programa I-Deas NX:

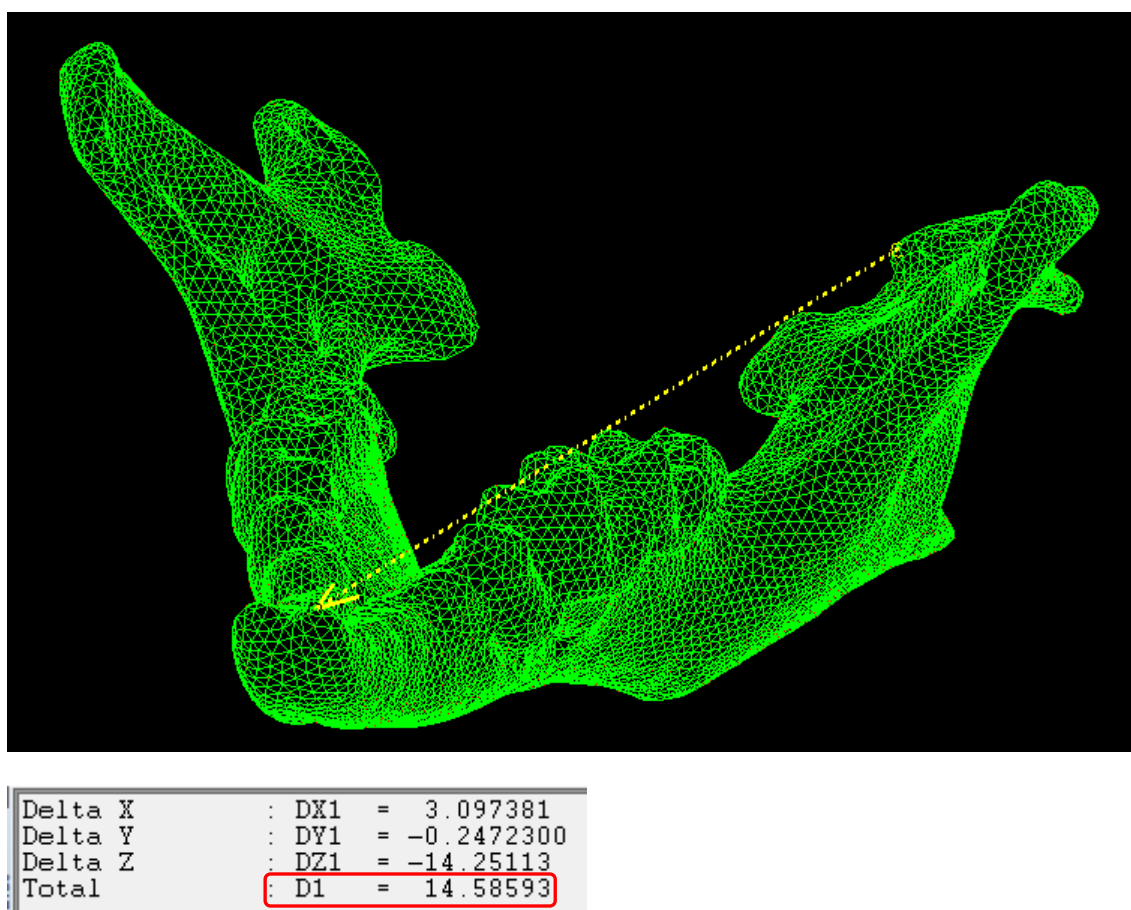


Figura 39. Captura del programa I-Deas NX donde se muestra la medida realizada para la variable R_m para el ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

El valor de R_m para el ejemplar *Blarina* es 14,59 mm.

Se muestra a modo resumen los valores de las variables:

- σ_e musaraña = 5,5 GPa
- R_m musaraña = 14,59 mm \approx 1,5 cm
- σ_e humano = 3,5 GPa
- R_m humano = 12 cm
- $F = 70$ kg

Y aplicando ahora la ecuación 1:

$$\pi_1 = \left[\frac{R_m^2 \sigma_e}{F} \right]_{humano} = \left[\frac{R_m^2 \sigma_e}{F} \right]_{musaraña}$$

$$\frac{(12 \text{ cm})^2 * 3,5 \text{ GPa}}{70 \text{ kg}} = 7,2 = \frac{(1,5 \text{ cm})^2 * 5,5 \text{ GPa}}{F \text{ (kg)}}$$

$$F_{musaraña} = 1,71 \text{ kg} = 16,76 \text{ N}$$

Se va a volver a estimar, en este caso con el ejemplar *Blarina*, cual es la tensión máxima que se generaría si realiza una mordedura con el incisivo de 16,76N. Para ello, se sustituye la carga genérica de 100N que se había definido en el caso del análisis de las tensiones en el incisivo de la mandíbula del ejemplar *Blarina*, por una cuyo módulo sea 16,76N.

Se sigue cumpliendo la linealidad en el problema, por lo que las tensiones producidas seguirán siendo proporcionales a las fuerzas que las producen. Se cumple así que la tensión producida por una carga de 100N es proporcional a la que se genera con una carga conocida, por lo que se puede calcular así:

$$\sigma = \frac{F}{100 \text{ N}} * \sigma_{100N}$$

Interesa analizar el caso de la tensión máxima producida por la carga de 16,76N, por lo que se aplica la proporcionalidad explicada:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F}{100 \text{ N}} * \sigma_{m\acute{a}x-100N}$$

Y conocida la tensión máxima que se generaba en los incisivos debido a la mordedura (con un módulo de 100N), que es de 733,33 MPa (fig. 34), y la fuerza que actúa en este caso (16,76N), tan solo hay que sustituir en la ecuación anterior:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{16,76 \text{ N}}{100 \text{ N}} * 733,33 \text{ MPa} = 122,9 \text{ MPa}$$

La tensión máxima que se producirá cuando la mordedura en el incisivo es de 16,76N es de 122,9 MPa.

Se comprueba este resultado sustituyendo el módulo de 100N de la carga que se ha analizado anteriormente por el de 16,76N y ver si la tensión sobre el elemento (cuya ID es 196513) donde se registra la mayor tensión coincide con la calculada teóricamente. La tensión sobre este elemento se ve en la siguiente figura:

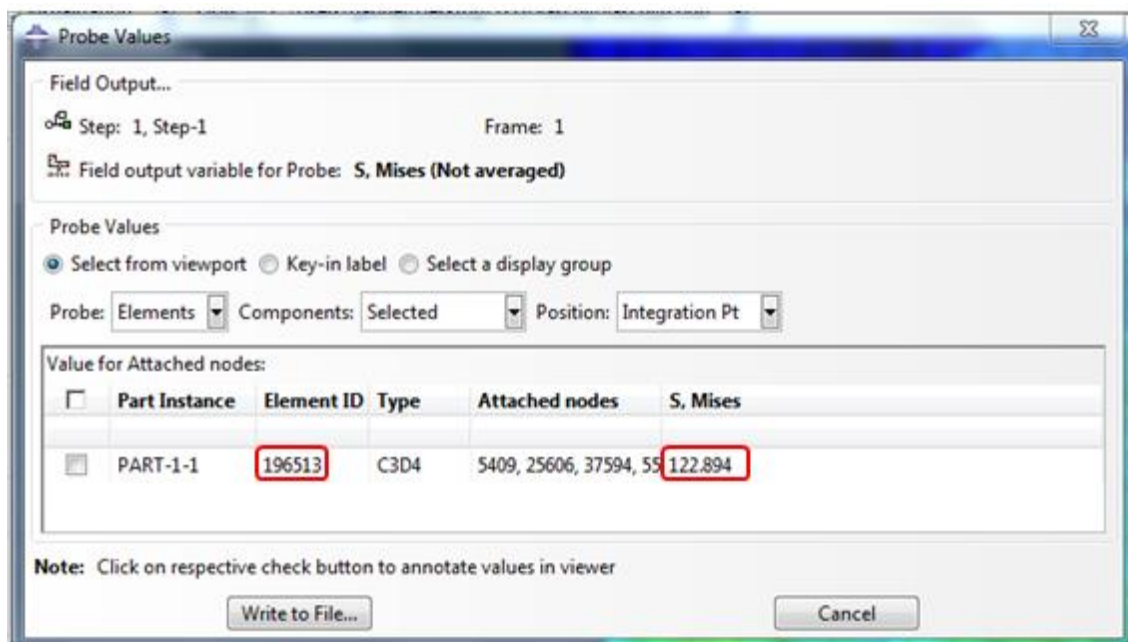


Figura 40. Captura que muestra el valor de la tensión de von Mises en el elemento donde se registra la mayor tensión en el modelo *Blarina* con la nueva carga estimada.

De nuevo queda comprobada la linealidad del problema y se cumple el resultado teórico.

A modo de resumen se muestran las tensiones máximas de von Mises que se generarían en los incisivos de ambos ejemplares:

- Tensión máxima de von Mises para *Dolinasorex glyphodon*: 126,3 MPa.
- Tensión máxima de von Mises para *Blarina*: 122,9 MPa.

Al no disponer del valor de tensión de rotura a compresión, se va a utilizar como valor de referencia la dureza de la zona pigmentada. Como ya se ha explicado en el alcance de este Trabajo, se realiza la hipótesis de que existe una relación entre la resistencia a compresión y la dureza, haciendo una analogía con lo que sucede en los aceros. El valor de la dureza para la zona pigmentada oscila entre 5,5 y 6 GPa. Se compara con ésta ya que la tensión máxima se registra en una zona donde existe esmalte pigmentado.

Se realiza la comparación con el ejemplar *Dolinasorex glyphodon*:

$$\sigma_{\max \text{ vM}} \text{ Dolinasorex glyphodon} = 126,3 \text{ MPa} \ll 5,5 \text{ GPa, dureza zona pigmentada}$$

Y a continuación con el ejemplar *Blarina*:

$$\sigma_{\max \text{ vM}} \text{ Blarina} = 122,9 \text{ MPa} \ll 5,5 \text{ GPa, dureza zona pigmentada}$$

En ambos casos la tensión máxima es incluso un orden de magnitud menor que el valor de la dureza, por lo que pese a no poseer el valor del límite elástico es altamente improbable que se produzca la fractura de los incisivos en ambos casos.

9. Análisis morfológico y mecánico de los molares del ejemplar *Blarina*

Los molares de la musaraña *Blarina* presentan una forma muy característica ya que en cada molar se pueden discernir dos partes claramente diferenciadas. Para facilitar la explicación, se muestra a continuación una imagen en la que se distinguen estas dos partes (Zona 1 y Zona 2) y serán nombradas así en las futuras explicaciones:



Figura 41. Fotografía realizada de la mandíbula del ejemplar *Blarina*.

En la figura 41 se puede observar que en cada molar (en este caso sobre el segundo molar), la mitad más próxima a los incisivos (Zona 2) tiene mayor altura que la mitad más interna (Zona 1). Esto hace pensar que a la hora de morder será la zona 2 la que entre en contacto en primer lugar, y la que soportará las mayores tensiones en el instante inicial de la mordedura.

Además de la diferencia de altura, la disposición de la zona de hierro en la Zona 2 es muy característica. Se muestra a continuación una fotografía donde se puede observar este hecho:

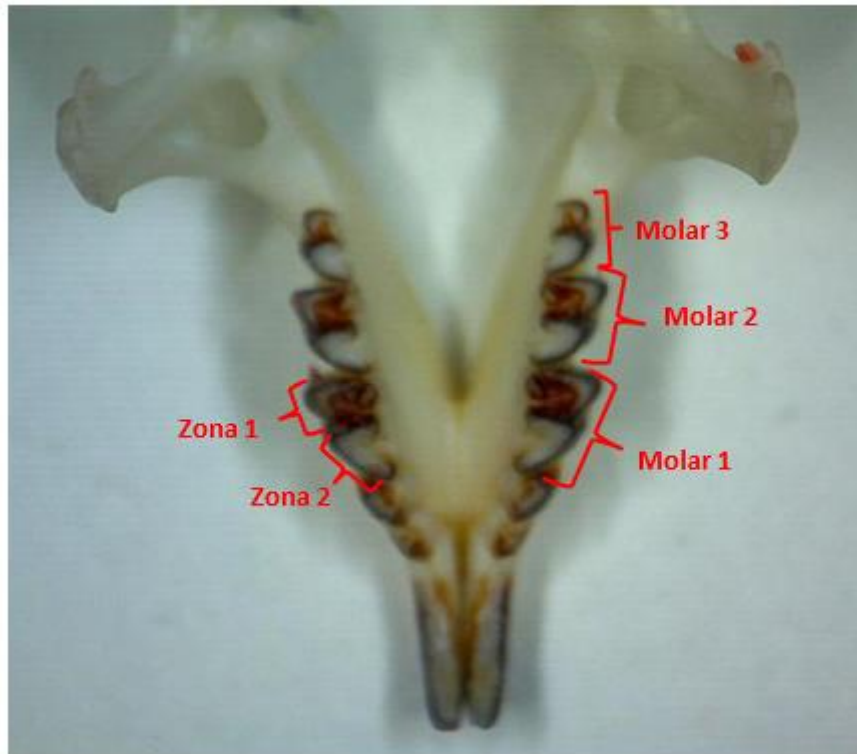


Figura 42. Fotografía tomada del ejemplar *Blarina*.

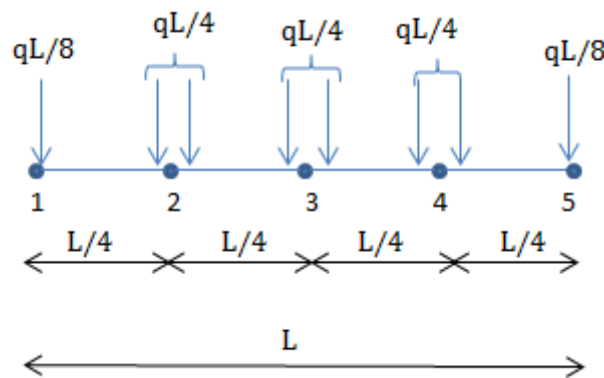
En la Zona 2 de cada uno de los tres molares los depósitos de hierro se encuentran en la zona más periférica del molar siguiendo una forma de “C”. Este hecho hace pensar que los depósitos de hierro están situados en las zonas donde se van a producir las mayores tensiones, ya que son las primeras en entrar en contacto, y además están afiladas. Estos depósitos de hierro poseen mayor dureza que el resto del molar, por lo que su función podría ser soportar estas tensiones mayores que se producen al inicio de la mordedura, y una vez éstas se relajaran, la presencia de los depósitos de hierro ya no sería imprescindible cuando prosigue la penetración del molar.

Se van a analizar las tensiones que se producen cuando la Zona 2 del molar entra en contacto con la superficie a la cual está mordiéndolo. Una vez obtenidas las tensiones que se producen, se va a buscar si la variación de las tensiones guarda una relación con la variación de dureza que se produce debido a la transición entre el esmalte pigmentado al esmalte que no lo posee. Se compara con la dureza de nuevo, ya que no se posee el valor de resistencia de rotura a compresión.

9.1 Procedimiento

Primeramente se va a definir una carga distribuida sobre el filo de la zona 2 en el modelo que se posee de la mandíbula del ejemplar *Blarina*. Siguiendo la teoría de Elementos Finitos, para definir una carga distribuida por unidad de longitud sobre nodos igualmente distanciados, sobre los nodos de los extremos se debe aplicar la mitad del valor de la carga que existe de nodo a nodo, mientras que en los nodos centrales se coloca el valor de la carga que existe de nodo a nodo. Esto se muestra en el siguiente **Ejemplo**:

Se tiene una barra de longitud, L , y con una carga distribuida de valor q . La barra consta de 5 nodos igualmente separados, y por lo tanto de 4 tramos de igual longitud. La carga en cada tramo será entonces $qL/4$. Así la carga en cada extremo del tramo donde se encuentran los nodos es $qL/8$. En los nodos centrales (nodos 2, 3 y 4) se suma la fuerza correspondiente a cada tramo, por lo que en estos nodos la carga es el doble que la carga que hay en los nodos extremos (nodos 1 y 5). Se muestra esto en la siguiente figura:



Para el caso a estudio, se trata de realizar una analogía con el caso explicado del elemento barra. Se van a seleccionar nodos pertenecientes a la cresta de la zona 2 del primer molar, tratando que estén separados la misma distancia aproximadamente. Se desea que la carga total aplicada sobre el filo de la zona 2 sea una carga genérica de 100N (qL), por lo que se deberá dividir la carga entre el número de tramos que van a existir entre los nodos del modelo sobre los que se va a aplicar esta carga.

Siguiendo el procedimiento que se ha seguido durante este trabajo, el primer paso es definir sobre el programa I-Deas NX el grupo de nodos de la mandíbula sobre los que se desea que actúe la carga. Se trata de elegir los nodos que forman parte del filo de la Zona 2 en el Molar 1, que va a ser el molar sobre el que se va a centrar este análisis. En la siguiente captura se muestra cual han sido finalmente los nodos seleccionados para formar el grupo de nodos, marcados en azul:

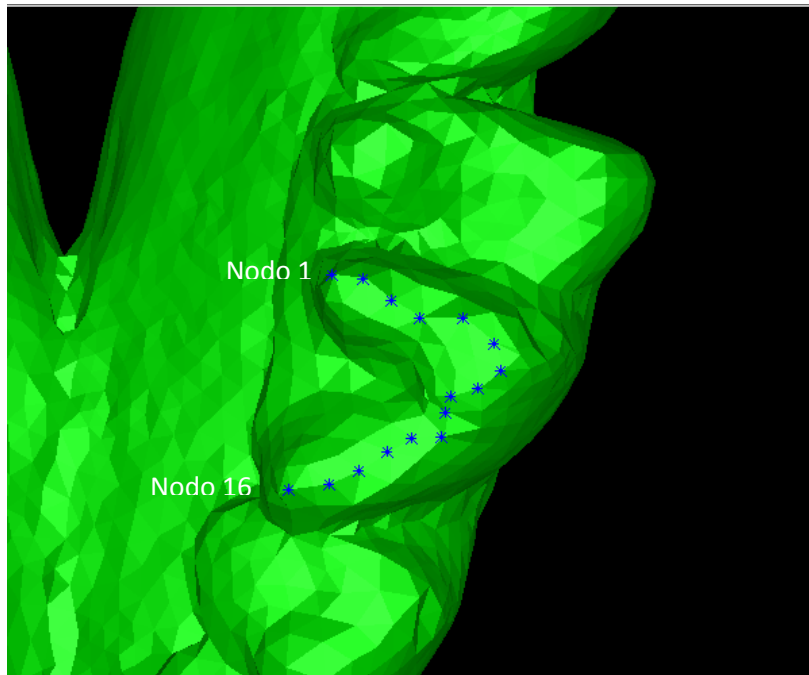


Figura 43. Grupo de nodos que conforman el filo de la zona 2 en el Molar 1.

Este grupo está formado por 16 nodos, por lo que sobre el nodo 1 y 16 la carga asignada será la mitad que para el resto de nodos. Al ser una carga de 100N, se divide esta entre 15 (los tramos que existen entre nodos):

$$\frac{100N}{15} = 6,67N$$

Y se asigna este valor entre los nodos 2 y 15, mientras que a los nodos 1 y 16 se les aplica la mitad de esta carga, 3,33N.

Para poder observar con mayor detalle las zonas que poseen depósitos de hierro, se realiza una vista con corte de la mandíbula (corte A-A'), que permite ver la estructura interna que ésta posee:

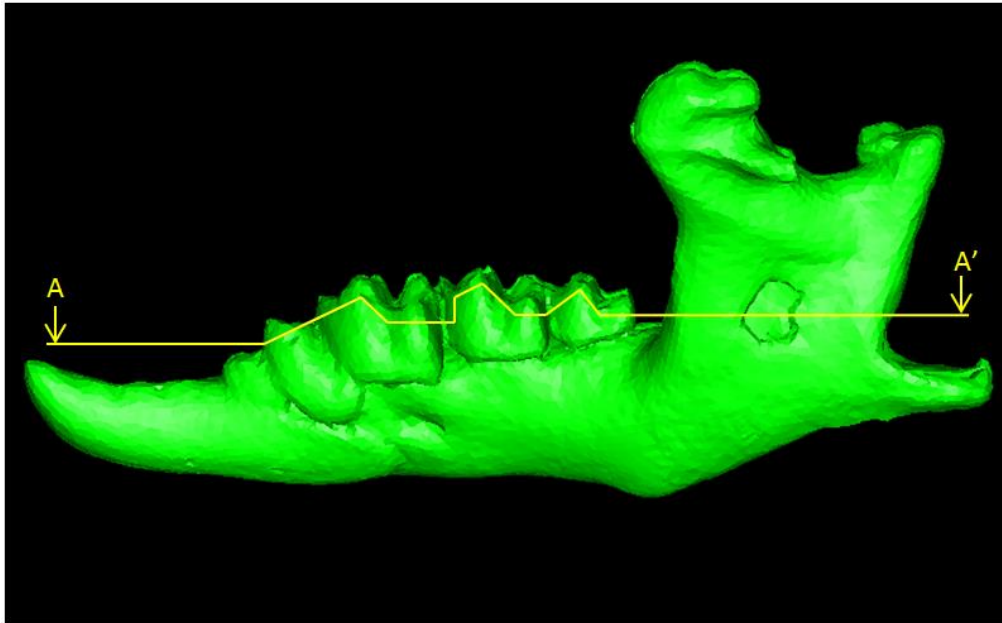


Figura 44. Corte A-A' sobre el modelo de la mandíbula *Blarina* en el programa I-Deas NX.

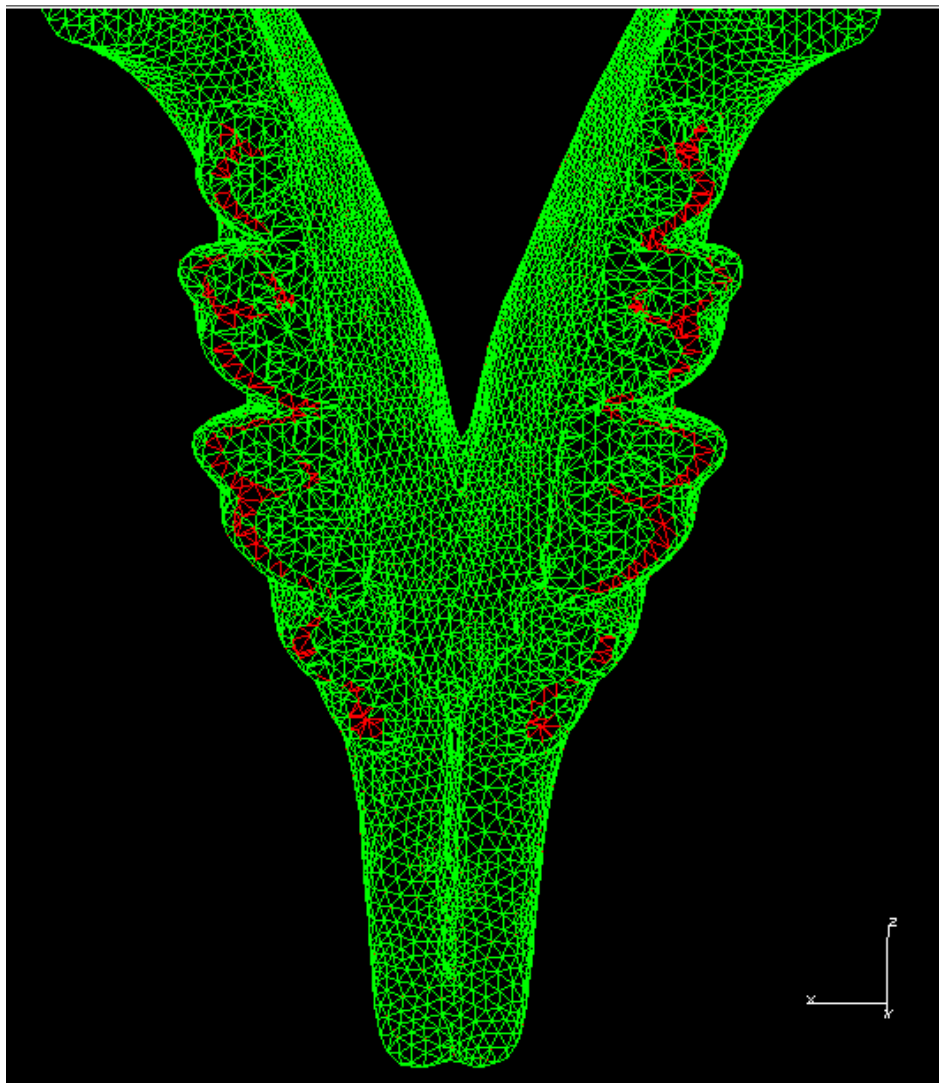


Figura 45. Corte A-A'

En este corte (fig. 45) se pueden observar perfectamente los depósitos de hierro, y sobre éste se mide el espesor aproximado de estos depósitos. Esta medida es importante, ya que se busca la variación de tensión que se produce a lo largo del espesor del filo de esta zona, y si varía en relación con la variación de dureza que se produce entre la zona pigmentada y no pigmentada. Se realizan diferentes medidas del espesor de los depósitos de hierro sobre el modelo, y finalmente se obtiene un espesor promedio de 0,18 mm.

Se exporta el archivo .inp del programa I-Deas NX para ser ejecutado en Abaqus CAE y se modifica éste según el procedimiento explicado en el **Anexo I**. Cabe destacar que las cargas de nuevo van a seguir el sentido negativo del eje Z, como ya sucedía cuando se ha analizado las tensiones producidas en los molares sobre este ejemplar.

A continuación, se ejecuta el archivo y se pasan a analizar los resultados en el programa Abaqus CAE. El estado tensional que presenta esta zona de la muela tras aplicar la carga genérica de 100N es el siguiente:

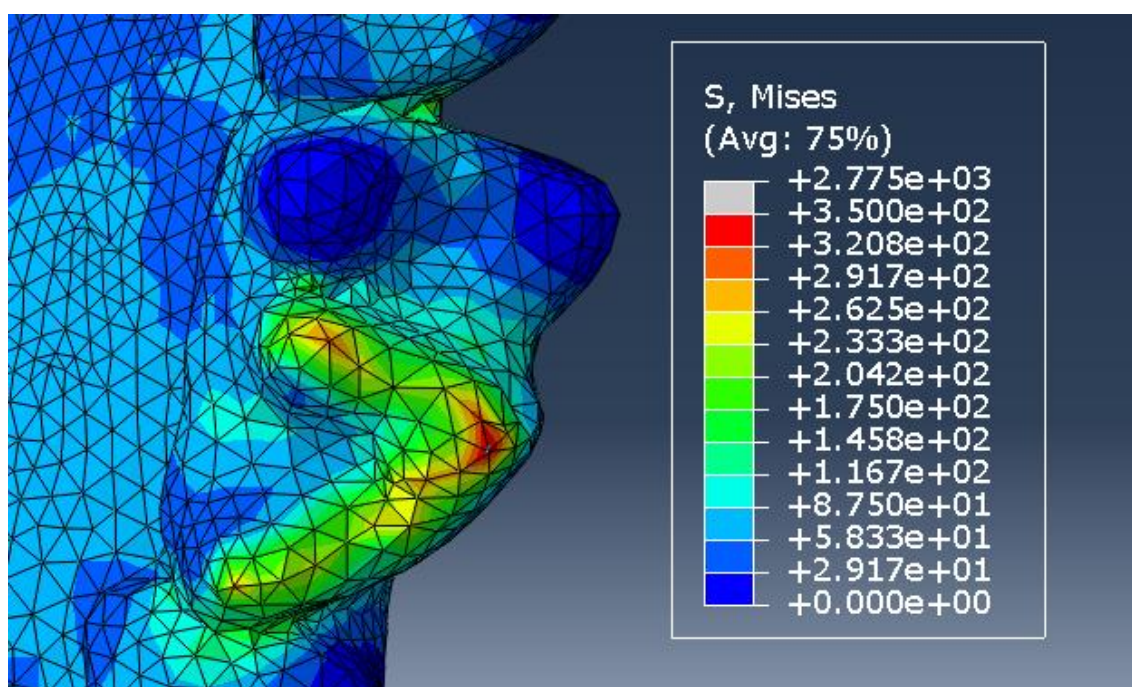


Figura 46. Estado tensional del filo del Molar 1.

Para poder ver la variación de las tensiones producidas en función del espesor, se procede a definir varias trayectorias (*paths*) seleccionando los nodos que éstas deben seguir. Se muestran a continuación las tres trayectorias seleccionadas que cruzan el filo de manera transversal:

Trayectoria 1:

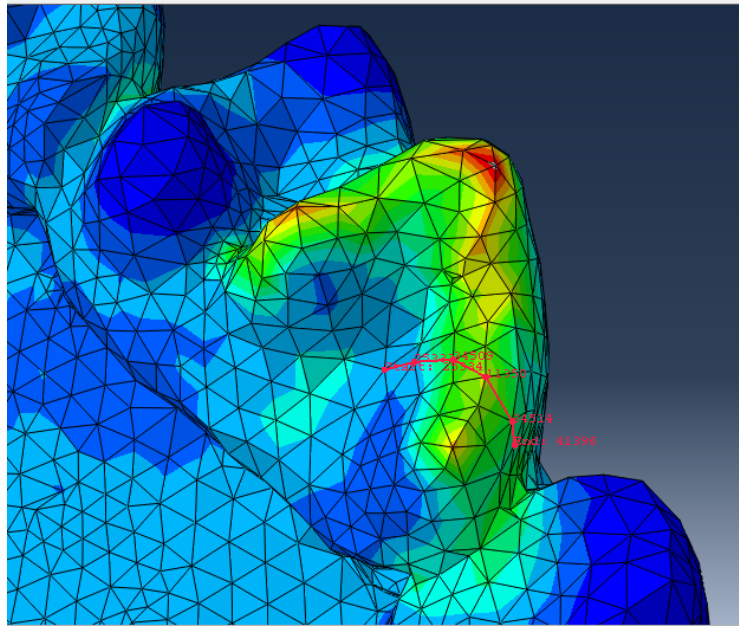


Figura 47. Primera trayectoria (*path*) analizada.

Trayectoria 2:

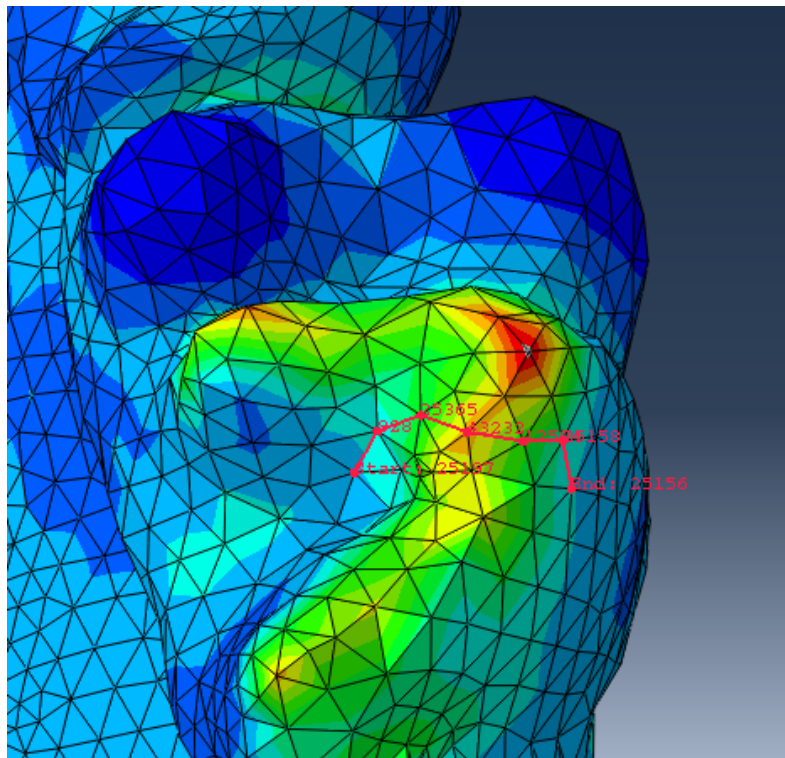


Figura 48. Segunda trayectoria (*path*) analizada.

Trayectoria 3:

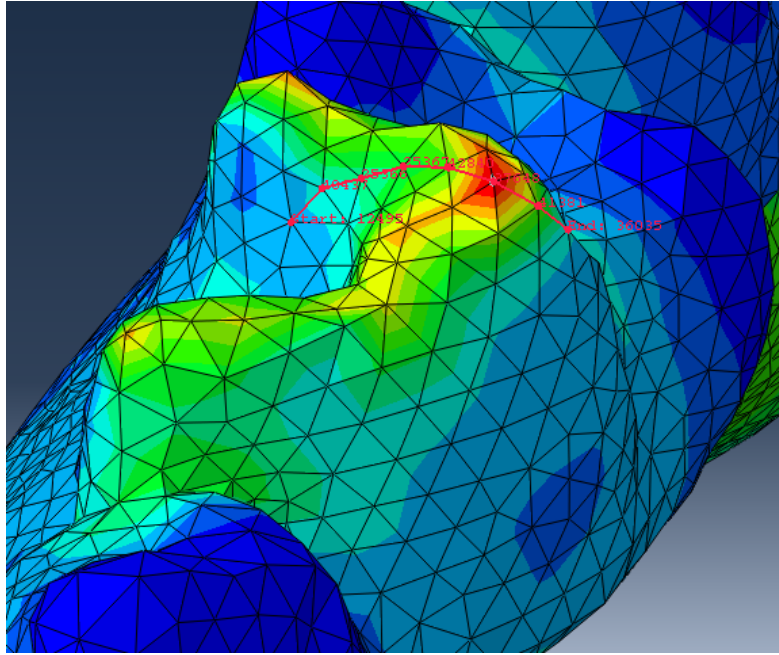


Figura 49. Tercera trayectoria (*path*) analizada.

En las tres trayectorias, uno de los nodos que las componen es precisamente uno de los 14 nodos centrales sobre los que se ha aplicado la carga, por lo que estos nodos (uno por trayectoria) presentaran la mayor tensión registrada en sus respectivas trayectorias.

Una vez definidas estas trayectorias, tan solo falta representar como varía la tensión a lo largo de cada trayectoria. Realizadas éstas, se procederá a recabar la información más relevante que muestran para el estudio que nos ocupa.

Variación de tensión en la trayectoria 1:

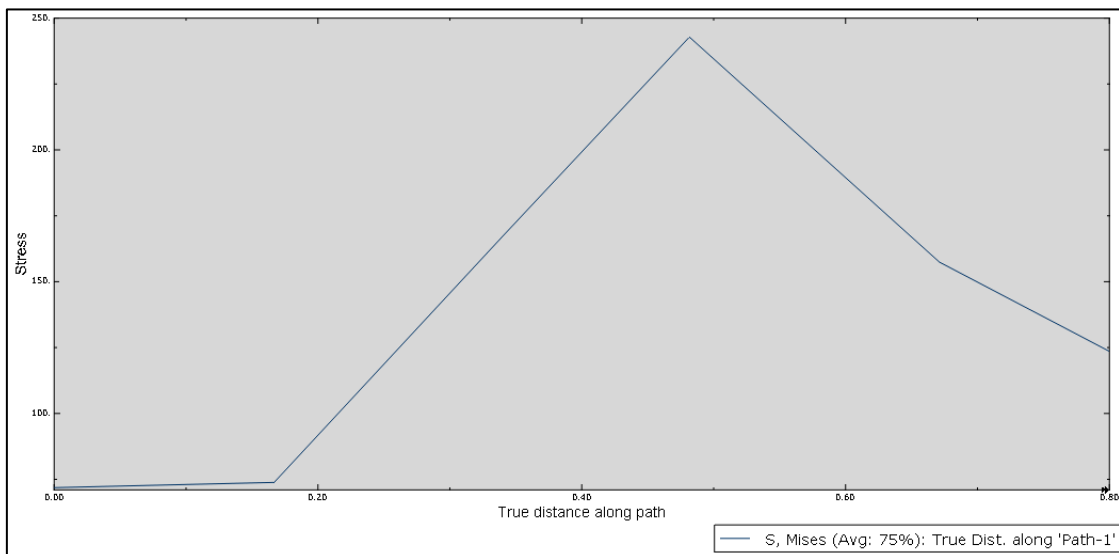


Figura 50. Variación de la tensión en función de la Trayectoria 1.

Se realiza una primera hipótesis que consiste en que el punto (nodo) donde se registra la mayor tensión ($\sigma_{\text{máx}}$) coincide con el punto medio de la capa del depósito de hierro. El espesor promedio de estos depósitos ha sido estimado en 0,18 mm, por lo que las tensiones de transición entre el esmalte pigmentado y el no pigmentado se encuentran 0,9 mm antes y 0,9 mm después del punto de mayor tensión. A partir de la gráfica se localizan estos puntos de transición y la tensión que le corresponde a cada uno (σ_1 y σ_2).

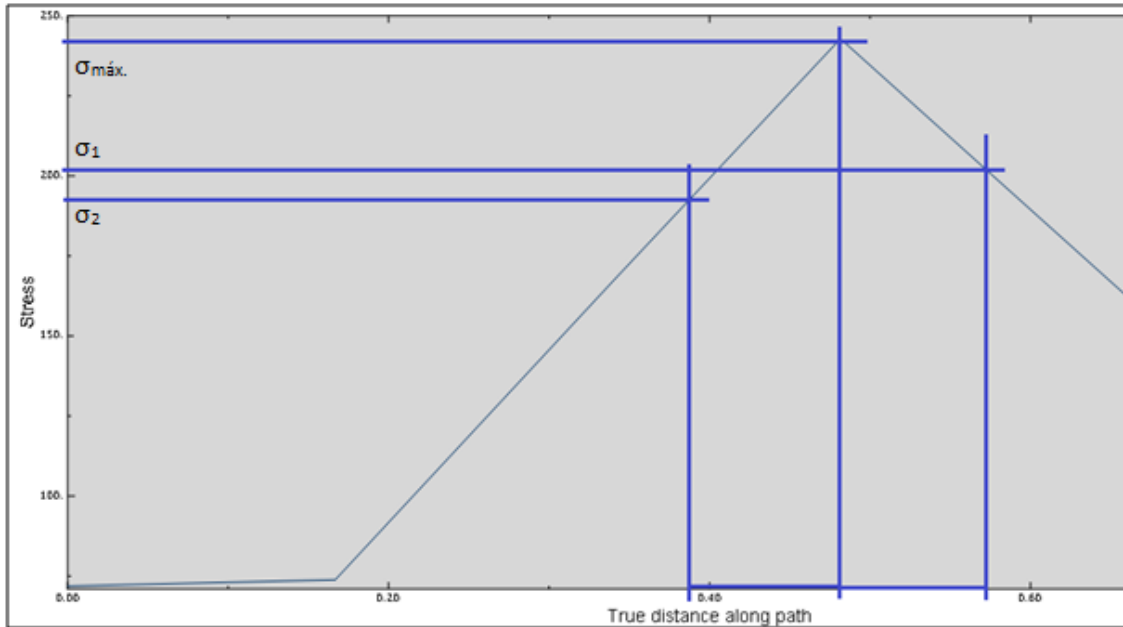


Figura 51. Tensiones Máxima y de Transición en la Trayectoria 1.

- La tensión máxima es $\sigma_{\text{máx}}=243$ MPa.
- La tensión correspondiente a la primera zona de transición es $\sigma_1=221$ MPa.
- La tensión correspondiente a la primera zona de transición es $\sigma_2=193$ MPa.

Se determina una tensión de transición promedio:

$$\sigma_{\text{transición}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{221 \text{ MPa} + 193 \text{ MPa}}{2} = 207 \text{ MPa}$$

Y por último se busca la relación que existe entre la tensión máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) y la tensión en la zona de transición entre el esmalte pigmentado y no pigmentado (σ_{trans}):

$$\frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{trans}}} = \frac{243 \text{ MPa}}{207 \text{ MPa}} = 1,17$$

Se busca ahora esta proporción entre la dureza que presenta el esmalte pigmentado y el no pigmentado. El valor de ambas durezas se ha estimado en base a los valores recogidos en el artículo de la revista Science [1]. El valor de dureza máximo del esmalte pigmentado es 6 GPa, mientras que el valor de dureza del esmalte no pigmentado es de 4,5 GPa. Se calcula la relación que existe entre ellas:

$$\frac{\text{Dureza esmalte pigmentado}}{\text{Dureza esmalte NO pigmentado}} = \frac{6 \text{ GPa}}{4,5 \text{ GPa}} = 1,33$$

Se puede observar que ambas relaciones son prácticamente iguales. Esto hace pensar que existe una relación directa entre la existencia del esmalte pigmentado y la dureza que presenta, con las tensiones a las que se ve solicitada. Una vez relajadas estas tensiones la presencia de los depósitos de hierro ya no es imprescindible y por ello el esmalte pasa a ser no pigmentado. Se va a tratar de reafirmar esta teoría con el segundo caso definido.

Variación de tensión en la trayectoria 2:

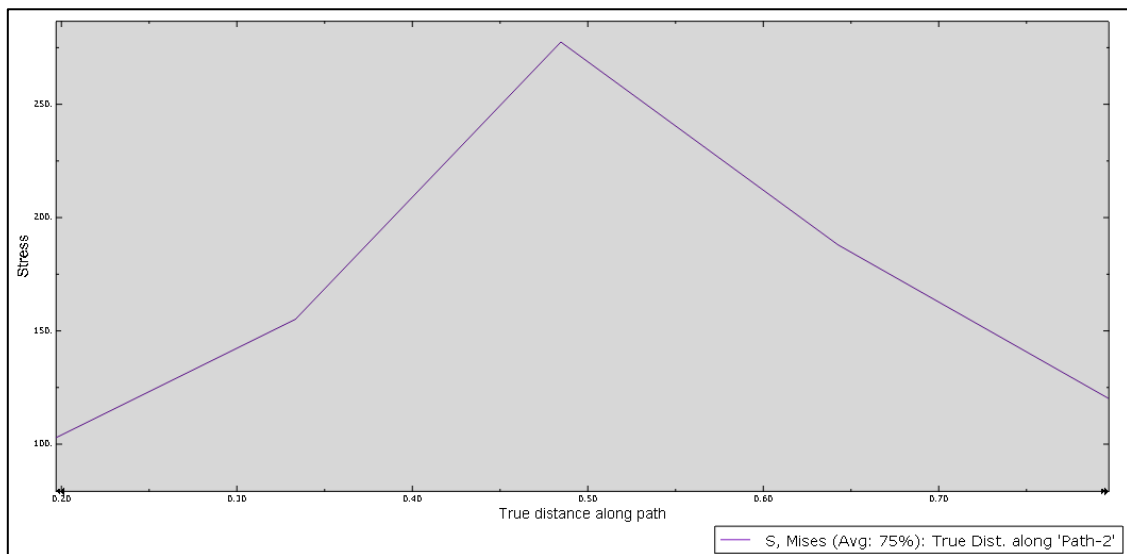


Figura 52. Variación de la tensión en función de la Trayectoria 2.

A partir de la trayectoria 2, se vuelve a obtener como varía la tensión en función del espesor del filo. Se vuelve a realizar la misma hipótesis que se ha realizado en el análisis de la trayectoria 1, que consiste en que el punto de mayor tensión coincide con el punto medio de la capa de esmalte pigmentado. De nuevo las zonas de transición entre el esmalte pigmentado y el no pigmentado se encuentran 0,9 mm antes y 0,9 mm después del punto de mayor tensión. A partir de la gráfica anterior (figura 52) y teniendo en cuenta las hipótesis formuladas se procede a obtener la tensión máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) y las tensiones en las zonas de transición entre la zona pigmentada y no pigmentada (σ_1 y σ_2).

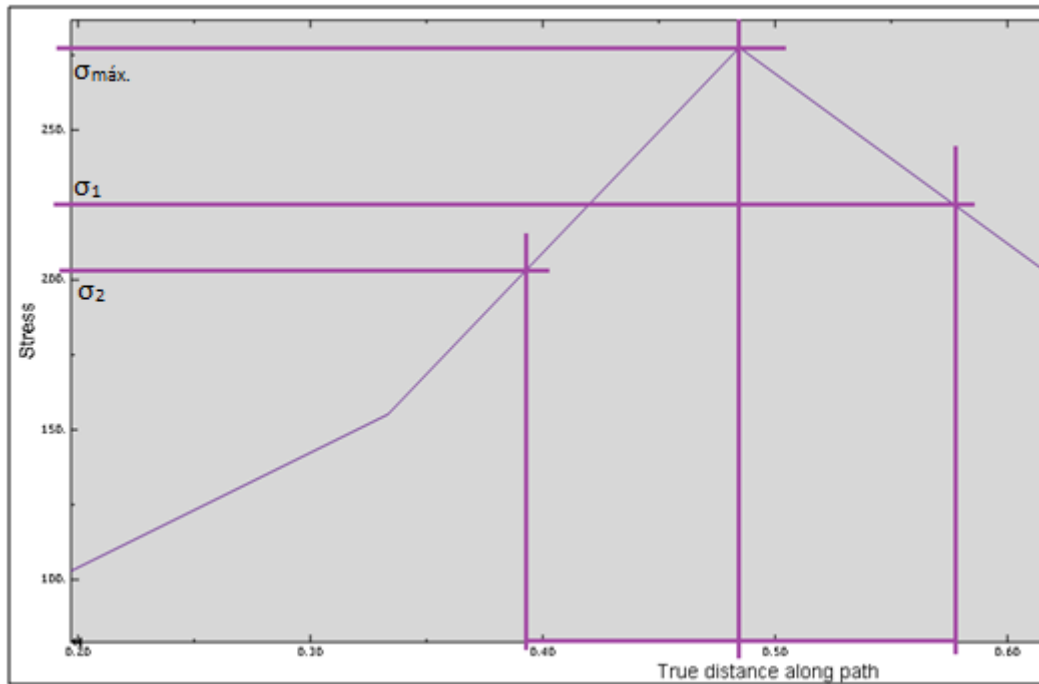


Figura 53. Tensiones Máxima y de Transición en la Trayectoria 2.

- La tensión máxima es $\sigma_{máx}=277$ MPa.
- La tensión correspondiente a la primera zona de transición es $\sigma_1=225$ MPa.
- La tensión correspondiente a la primera zona de transición es $\sigma_2=203$ MPa.

Se determina una tensión de transición promedio:

$$\sigma_{transición} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{225 \text{ MPa} + 203 \text{ MPa}}{2} = 214 \text{ MPa}$$

Se calcula de nuevo la relación entre la tensión máxima ($\sigma_{máx}$) y la tensión promedio en la zona de transición entre el esmalte pigmentado y no pigmentado (σ_1 y σ_2):

$$\frac{\sigma_{máx}}{\sigma_{trans}} = \frac{277 \text{ MPa}}{214 \text{ MPa}} = 1,3$$

Y como ya ha sido calculada anteriormente la relación entre la dureza que presenta el esmalte pigmentado y el no pigmentado:

$$\frac{\text{Dureza esmalte pigmentado}}{\text{Dureza esmalte NO pigmentado}} = \frac{6 \text{ GPa}}{4,5 \text{ GPa}} = 1,33$$

De nuevo queda reafirmada la patente relación que existe entre la variación de tensiones que aparece en el filo de esta zona del molar y la variación de dureza existente entre el esmalte pigmentado y no pigmentado.

Variación de tensión en la trayectoria 3:

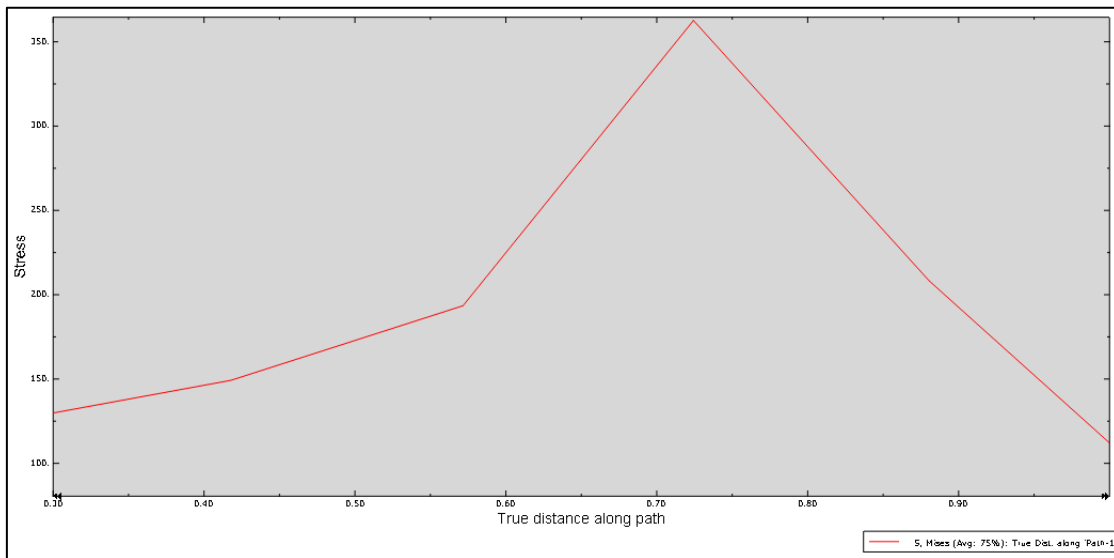


Figura 54. Variación de la tensión en función de la Trayectoria 3.

Se sigue el proceso utilizado para las otras 2 trayectorias, conservando la hipótesis en la que el punto de mayor tensión coincide con la mitad del espesor de la capa del esmalte pigmentado. Así las zonas de transición entre la zona pigmentada y no pigmentada se encontraran 0,9 mm antes y 0,9 mm después de este punto. Se busca de nuevo a partir de la gráfica anterior (fig. 54) la tensión máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) y las tensiones que se producen en la zona de transición entre el esmalte pigmentado y no pigmentado (σ_1 y σ_2), teniendo en cuenta la hipótesis formulada.

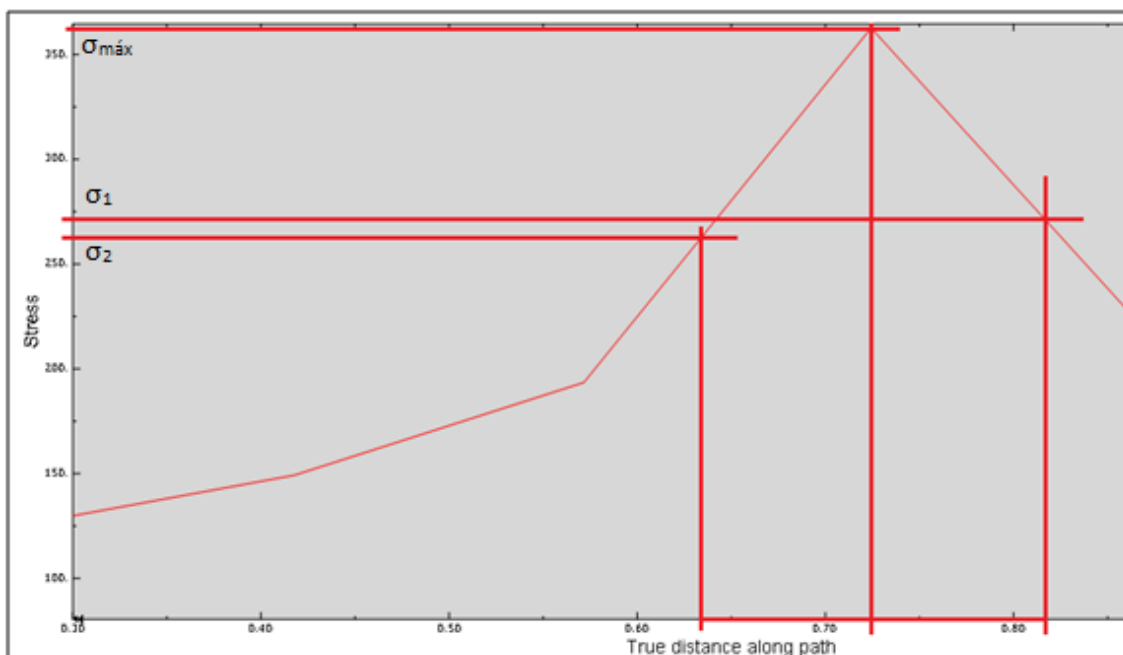


Figura 55. Tensiones Máxima y de Transición en la Trayectoria 3.

- La tensión máxima es $\sigma_{\text{máx}}=363 \text{ MPa}$.
- La tensión correspondiente a la primera zona de transición es $\sigma_1=273 \text{ MPa}$.
- La tensión correspondiente a la primera zona de transición es $\sigma_2=263 \text{ MPa}$.

Se determina una tensión de transición promedio:

$$\sigma_{\text{transición}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{273 \text{ MPa} + 263 \text{ MPa}}{2} = 268 \text{ MPa}$$

Se calcula a continuación la relación entre la tensión máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) y la tensión promedio en la zona de transición entre el esmalte pigmentado y no pigmentado (σ_1 y σ_2):

$$\frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{trans}}} = \frac{363 \text{ MPa}}{268 \text{ MPa}} = 1,35$$

Y sabiendo que la relación de dureza entre el esmalte pigmentado y no pigmentado es:

$$\frac{\text{Dureza esmalte pigmentado}}{\text{Dureza esmalte NO pigmentado}} = \frac{6 \text{ GPa}}{4,5 \text{ GPa}} = 1,33$$

Como se puede observar, en las tres trayectorias analizadas donde se estudia la variación de tensión respecto al espesor del filo, la relación que existe entre la tensión máxima y la tensión de transición entre el esmalte pigmentado y no pigmentado es prácticamente idéntica a la relación que existe entre la dureza del esmalte pigmentado y no pigmentado. En los dos primeros casos estas relaciones son muy semejantes, y la relación de durezas es un poco superior a la de las tensiones, lo que aun refuerza más la hipótesis que apunta a que los depósitos de hierro en esas zonas del filo existen para soportar las mayores tensiones que se generan en el inicio de la mordedura, y una vez relajadas estas, ya no es indispensable la presencia de los depósitos. En el tercer caso las relaciones son prácticamente iguales, pero al contrario de lo que sucedía con las dos primeros casos, la relación de tensiones es un poco superior a la de las durezas (1,35 frente a 1,33 respectivamente). Pese a ello, este resultado también es satisfactorio, ya que la trayectoria pasa por el punto de mayor tensión, lo que puede suponer una singularidad dentro del caso analizado. Además el mallado no es lo suficientemente fino, por lo que esa mínima diferencia que existe entre las relaciones de tensión y dureza no es significativa.

10. Conclusiones y Trabajo Futuro

Después de todo el estudio realizado, se puede concluir que los depósitos de hierro sí que tienen una influencia determinante en las tensiones que se darán en la dentadura de la mandíbula. Esta conclusión se ha obtenido principalmente del estudio más en profundidad de los molares del ejemplar actual (*Blarina*).

En el estudio de las tensiones que se producían cuando actuaban las cargas superficiales no se encontraba una relación directa y evidente con la presencia del esmalte pigmentado. La presencia de los depósitos de hierro le otorgan una mayor dureza, por lo que en las zonas con mayor tensión en la dentadura si que coincide con la presencia de esmalte pigmentado, pero no parece la causa principal por la cual las musarañas han evolucionado en esta dirección, desarrollando estos depósitos de hierro.

Cuando se ha decidido centrar el estudio en los molares del ejemplar actual sí que se ha encontrado una influencia mucho mas importante entre la presencia de los depósitos de hierro y las tensiones que debe soportar el esmalte dental. Debido a la morfología que presentan los molares, se ha observado que hay una zona del molar destinada a realizar la primera penetración cuando muerde a su presa, y este filo es el primero que se pone en contacto con ella. Debido a ésto, es de preveer que las mayores tensiones se darán lugar en esta zona, por lo que se ha estudiado en profundidad. Como resultado de este análisis, se ha concluido que la relación existente entre la dureza de la zona pigmentada y no pigmentada es prácticamente igual que la relación que existe entre las tensión que se dan en el filo de la zona pigmentada y la tenión en la zona de transición entre el esmalte pigmentado y no pigmentado. Por lo que la variación de tensión y la variación de dureza siguen una tendencia semejante. Una vez han sido rebajadas las tensiones inciales que se generán en el filo, donde la dureza es mayor, la presencia de hierro ya no es necesaria, por lo que deja de existir esmalte pigmentado.

Estas conclusiones podrían ser extrapolables al ejemplar proveniente de Atapuerca (*Dolinasorex glyphodon*), pero debido a la antigüedad del fósil se debería estudiar con mayor profundidad cual era la disposición del hierro originalmente en este espécimen (mientras existió) para poder sacar conclusiones respecto a él.

Este trabajo abre una nueva línea de investigación que va a continuar en el Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación, en el que uno de los subproyectos incluye este tipo de análisis sobre las mandíbulas, en el que se incluye entender el proceso evolutivo, analizar su microestructura e incluso la aplicación de estos depósitos de hierro en los seres humanos.

11. Referencias

- [1] Lyle M. Gordon, Michael J. Cohen, Keith W. MacRenaris, Jill D. Pasteris, Takele Seda, Derk Joester (2015). Amorphous intergranular phases control the properties of rodent tooth enamel. *Science*, Vol. 347 Issue 6223, 746-750.
- [2] Juan Rofes, Gloria Cuenca (2006). First evidence of the Soricidae (Mammalia) *Asoriculus Gibberodon* (Petényi, 1864) in the Pleistocene of North Iberia. *Revista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, Vol. 112 nº 2, 1-13.
- [3] Mimics 11.0 ® (Leuven, Belgium).
- [4] NX I-Deas 9 ® (Torrance, CA, USA).
- [5] Abaqus CAE 11 ® (Providence, RI, USA).
- [6] Julio Barrancos Mooney, Patricio J. (2006). *Operatoria dental. Integración Clínica*. 4ª Edición. Ed. Médica Panamericana.
- [7] Camilo Alberto Rivera Velázquez (2012). *Comportamiento mecánico del esmalte dental*. Universidad EAFIT, Medellín.
- [8] Iturriaga W. (2012). *Fuerza Masticatoria*. Facultad de Medicina, Universidad de la Frontera.

12. Bibliografía

Peña Baquedano, E. (2013). *Apuntes de mecánica del sólido deformable* (Universidad de Zaragoza).

Calvo Calzada B., Martínez Barca M.Á. and Peña Baquedano, E. (2013). *Apuntes de Elementos Finitos para sólidos deformables* (Universidad de Zaragoza).

París, F. (1996). *Teoría de la Elasticidad* (Servicio de Publicaciones E.T.S.I.I. Universidad de Sevilla).

Buckingham, E.: *On physically similar systems. Illustrations of the use of dimensional equations*. Physical Review 4, 345-376 (1914).

ANEXOS

Anexo I. Edición de los archivos .inp

Los archivos .inp que se generan en el programa I-Deas y que posteriormente se modifican según el caso a estudio para ser ejecutados en Abaqus CAE tienen la siguiente estructura:

- Elementos y tipo de elementos del modelo
- Nodos del modelo
- Definición de materiales y asignación de éstos a las regiones correspondientes
- Grupos de Nodos previamente definidos y listado de los nodos pertenecientes a cada uno de ellos
- Grupos de Elementos definidos previamente y listado de los elementos que pertenecen a cada grupo
- Definición de las cargas que actúan
- Condiciones de Contorno

El primer punto que debemos modificar es la definición de los materiales, ya que los elementos y los nodos del modelo ya están definidos.

En este punto lo primero que se debe hacer es definir el material que se quiera generar, y darle un nombre. A continuación, se define que el material es elástico e isótropo. Por último se da valor a las 2 constantes que definen al material, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, que definen al material ya que es elástico, lineal e isótropo. En el caso de la figura se define el material que no posee depósitos de hierro (Zona Hueso), y cuyo módulo de Young es $E=31850$ MPa y el coeficiente de Poisson es $\nu=0,3$. En este anexo todas las tensiones que aparecen van en MPa, las fuerzas en N y las longitudes en mm.

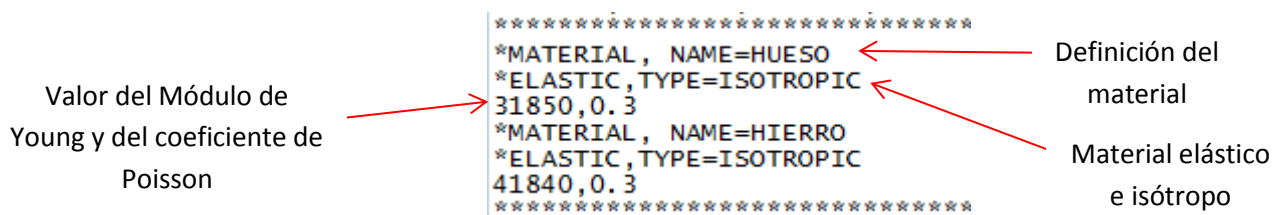


Figura 56. Captura archivo .inp donde se muestra la definición del material.

Una vez definidos los materiales que van a aparecer en el modelo, falta asignar éstos a los elementos. En estos modelos ya se han definido dos grupos como se ha explicado en la memoria (apartado *Refinado de malla y caracterización mecánica*), uno donde se encuentran los elementos que corresponden con las partes de la mandíbula que poseen depósitos de hierro y otro con las partes que no los poseen, por lo que esta asignación es inmediata.

En la figura se muestra un ejemplo de esta asignación:

```

*****
*SOLID SECTION,ELSET=HIERRO1,MATERIAL=HIERRO
*SOLID SECTION,ELSET=HUESO1,MATERIAL=HUESO
*****

```

Figura 57. Captura archivo .inp donde se muestra la asignación del material.

Las dos siguientes secciones que aparecen en el archivo son los grupos de nodos y elementos previamente definidos en I-Deas. Dentro de cada grupo se detalla qué elementos o qué nodos pertenecen a cada uno de ellos.

A continuación se deben definir las cargas que actúan, que variarán según el caso a analizar. Se debe definir en cada paso (*Step*) si la carga es estática o dinámica. En los casos a analizar sólo habrá un *Step*, ya que la carga se aplica en un solo paso, y la carga será estática. Después se determina sobre qué nodos actúa la carga. El haber creado grupos de nodos previamente según la región sobre la que se quiere que actúe la carga facilita mucho este proceso, ya que simplemente hay que definir sobre qué grupo(s) se debe actuar.

Una vez determinados estos parámetros hay que definir el vector de fuerza que va actuar en módulo, dirección y sentido. En los casos a estudio, y como se ha explicado en la memoria (apartado *Cálculo tensional*), el módulo de las cargas será de 50 N en el caso de la mandíbula *Dolinasorex glyphodon* y de 100 N para el caso del *Blarina*. Conocido el número de nodos sobre el que va a actuar cada carga, se divide 100N (o 50N, según corresponda) entre este número de nodos, ya que el módulo ha de introducirse por nodo en el archivo.

Definido el módulo, falta por determinar la dirección y el sentido de la carga. Esta dirección se determina acorde al sistema coordenado que poseen los modelos de las mandíbulas. En el caso de **las cargas sobre los molares**, ambos modelos se han girado convenientemente para hacer coincidir un eje principal del sistema de coordenadas con la dirección que se desea que lleve la carga, facilitando así la definición de la dirección y el sentido. Como se ha comentado ya en la memoria, en el caso del *Dolinasorex glyphodon* las cargas sobre los molares estarán en la dirección Z, y en sentido negativo. Mientras que para el caso del modelo de la mandíbula *Blarina*, la dirección que debe llevar las cargas sobre los molares estará en la dirección Y, en sentido negativo también. A continuación se muestra un ejemplo de cómo se definen las cargas sobre los molares en el ejemplar *Blarina*:

```

*****
*STEP
*STATIC|
*CLOAD
CARGA1,2,-1.01

```

Grupo de nodos sobre los que actúa la carga → **CARGA1**
 Dirección que lleva la carga (en este caso eje Y=2) → **2**
 Módulo por nodo, en este caso 100N/99 nodos=1.01N/nodo, y el signo negativo porque va en -Y → **-1.01**

Figura 58. Captura archivo .inp donde se muestra la definición de las cargas.

La determinación de la **cargas sobre los incisivos** es un poco más laboriosa, ya que la dirección que llevan no coincide con ningún eje principal, por lo que hay que descomponer el vector según los tres ejes principales.

Para determinar la dirección, sobre el modelo en I-Deas se dibuja un vector, cuya dirección será la que después tendrá el vector de la carga. Se trata que este vector tenga una dirección similar a Se obtiene la información sobre el módulo de este vector, y sus proyecciones en los planos XY, YZ y XZ. Con estos cuatro parámetros se puede obtener los ángulos sobre los que está proyectado el vector sobre cada eje.

Una vez conocido cómo se ha de descomponer el vector, se divide de nuevo el módulo (100N o 50N según sea el modelo *Blarina* o del *Dolinasorex glyphodon* respectivamente) entre los nodos sobre los que va actuar y después este vector por nodo se descompone en los ejes principales. A continuación se muestra un ejemplo de las cargas sobre los incisivos en el modelo *Blarina*. Esta figura pertenece a un corte realizado sobre el modelo, en la zona del incisivo, y en amarillo esta el vector sobre el que se obtiene la información para poder después determinar la dirección de la carga.

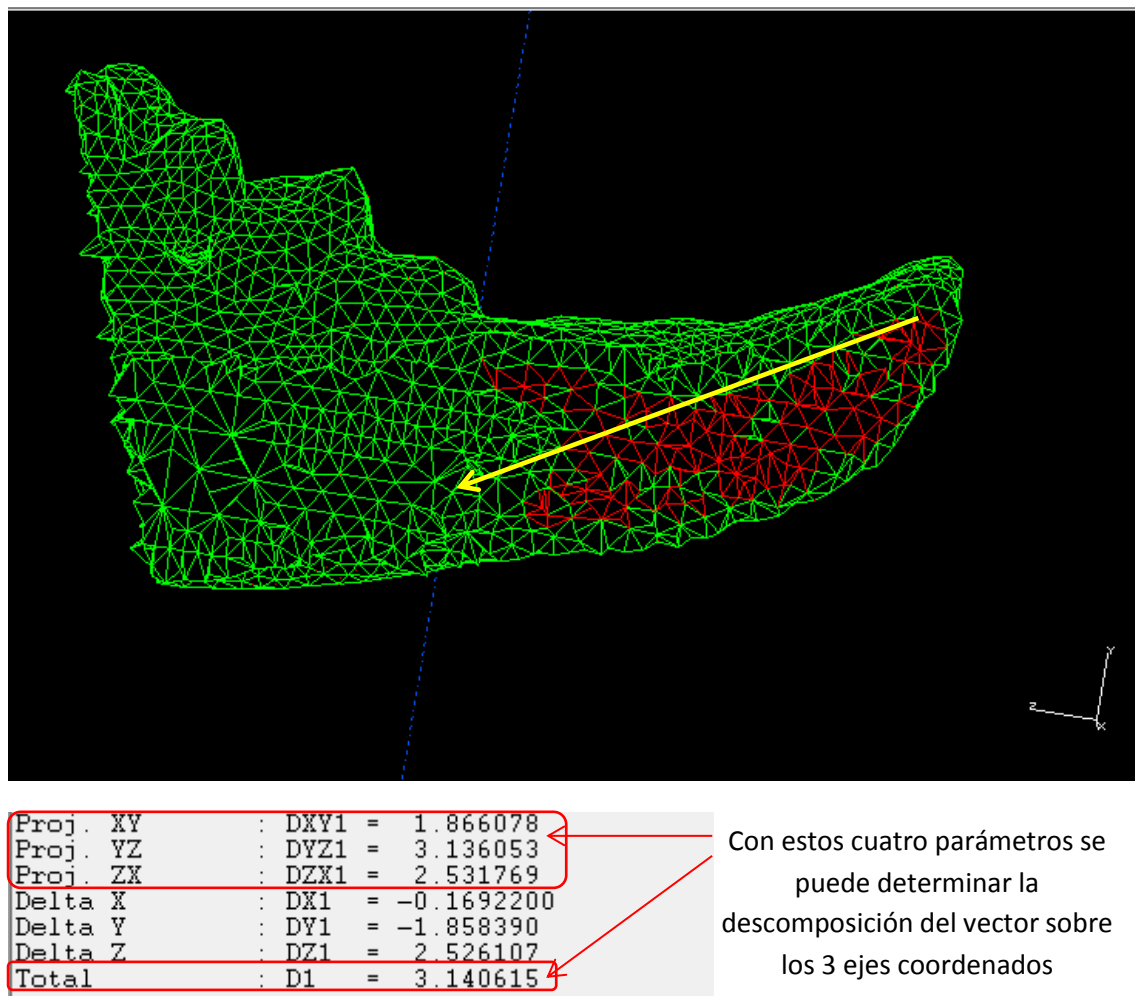


Figura 59. Captura del archivo .inp donde se muestran los valores que permiten definir el ángulo de la carga.

Los valores de Delta X,Y,Z nos dan la información sobre el sentido que deben llevar en los 3 ejes.

A continuación se muestra como se introduce la carga una vez descompuesta en el archivo:

```
*STEP
*STATIC
*CLOAD
CARGA4,1,0.19679
CARGA4,2,-2.4833
CARGA4,3,4.0576
```

→ Carga sobre eje X=1
→ Carga sobre eje Y=2
→ Carga sobre eje Z=3

Como se puede observar es muy similar al caso anterior, pero en vez de haber solo una carga en un eje, esta vez hay cargas en los 3 ejes, con su correspondiente sentido.

Por último es necesario definir las condiciones de contorno. En ambos modelos se ha de impedir el desplazamiento en los 3 ejes en los nodos que forman las articulaciones (grupo de nodos llamado Apoyos). Además para el caso del modelo *Dolinasorex glyphodon*, se ha de impedir el movimiento en el eje perpendicular al plano de simetría. Por ello, sobre los nodos que componen el plano de simetría se impedirá su movimiento sobre el eje perpendicular a éste (que en este caso será el eje X como se ha explicado en la memoria). Para definir las condiciones de contorno, lo primero es determinar el grupo de nodos sobre el que se van a imponer éstas. Seguidamente se establecen los ejes sobre los que se van a imponer estas condiciones. Se escriben de eje a eje, por lo que si queremos que actúe en los 3 ejes se ha de escribir que va del 1 (eje X), al 3 (eje Z). Si simplemente queremos que actúa sobre 1 eje, por ejemplo el eje X, se escribe que va del eje 1 (eje X) al eje 1 de nuevo. Solo falta definir el desplazamiento que se impone, que para nuestro caso es 0. Finalmente se introduce el final del paso (*End Step*).

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se definen las condiciones de contorno en el modelo *Dolinasorex glyphodon*:

```
*BOUNDARY
APOYOS,1,3,0.0
SIMETRIA,1,1,0.0
*END STEP
```

Grupos de nodos sobre los que se imponen las condiciones: Apoyos y los nodos del plano de Simetría

→ Se impiden los desplazamiento de todos los ejes (del X=1 al Z=3)
→ Se impide el desplazamiento solo en el eje X=1 para la simetría

Figura 60. Captura del archivo .inp donde se muestra como definir las condiciones de contorno.

Queda así descrito como se realiza el archivo .inp, quedando listo para su posterior ejecución en el programa Abaqus CAE.

Anexo II. Resultados tensionales obtenidos en los casos de cargas aplicadas sobre los molares

En este Anexo se van a mostrar las tensiones que se generan cuando las cargas son aplicadas en los molares de las mandíbulas tanto del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*, como del ejemplar *Blarina*.

Se va a proceder a aplicar las cargas en cada molar por separado. En el caso del *Dolinasorex glyphodon* solo se posee la mitad inferior de la mandíbula por lo que solo se aplicará carga en un molar, pero como ya se ha explicado en la memoria, se ha impuesto la condición de simetría. Además la carga a la que se le va a someter va a tener la mitad del valor del módulo (50N) que la carga genérica de 100N a la que se somete a la mandíbula inferior completa del ejemplar *Blarina*.

Se va a analizar en **primer caso** las tensiones para cada molar en el modelo del ejemplar *Blarina*. Este modelo es el mismo que se menciona en la memoria, y se varía únicamente la carga según el molar que se vaya a estudiar. Como ya se ha mencionado en la memoria los resultados tensionales se van a obtener con el programa Abaqus CAE. Se muestran en la siguiente figura los tres pares de molares sobre los que se va a realizar el análisis:

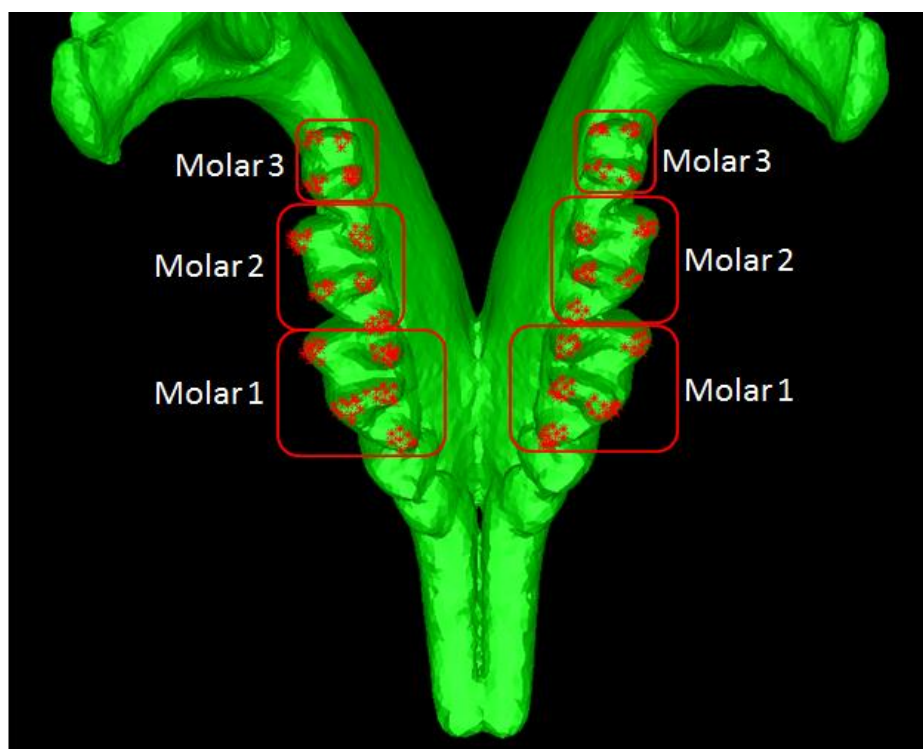


Figura 61. Identificación de los tres pares de molares sobre los que actuarán las cargas en el ejemplar *Blarina*.

Se van a mostrar a continuación los estados tensionales de las mandíbulas debido a las cargas sobre los molares, y se señalará la zona de tensión máxima de von Mises (se ha seleccionado esta tensión a modo comparativo) y su valor.

Tensiones Carga sobre los Molares M1:

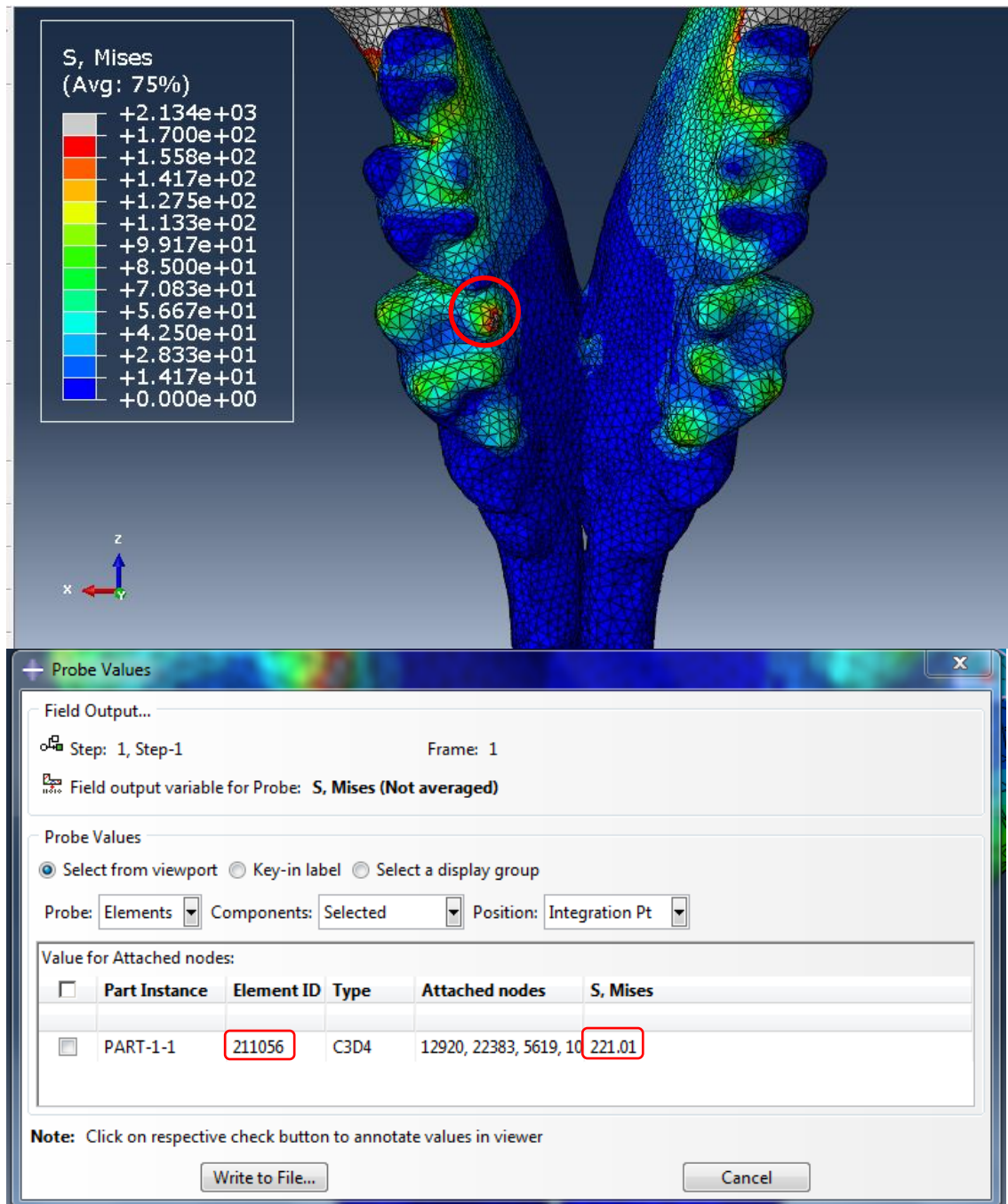


Figura 62. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Blarina* cuando actúa una carga de 100N sobre sus primeros molares y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises.

En el elemento cuya ID es 211056 se produce la mayor tensión de von Mises, cuyo valor es 221.01 MPa.

Tensiones Carga sobre los Molares M2:

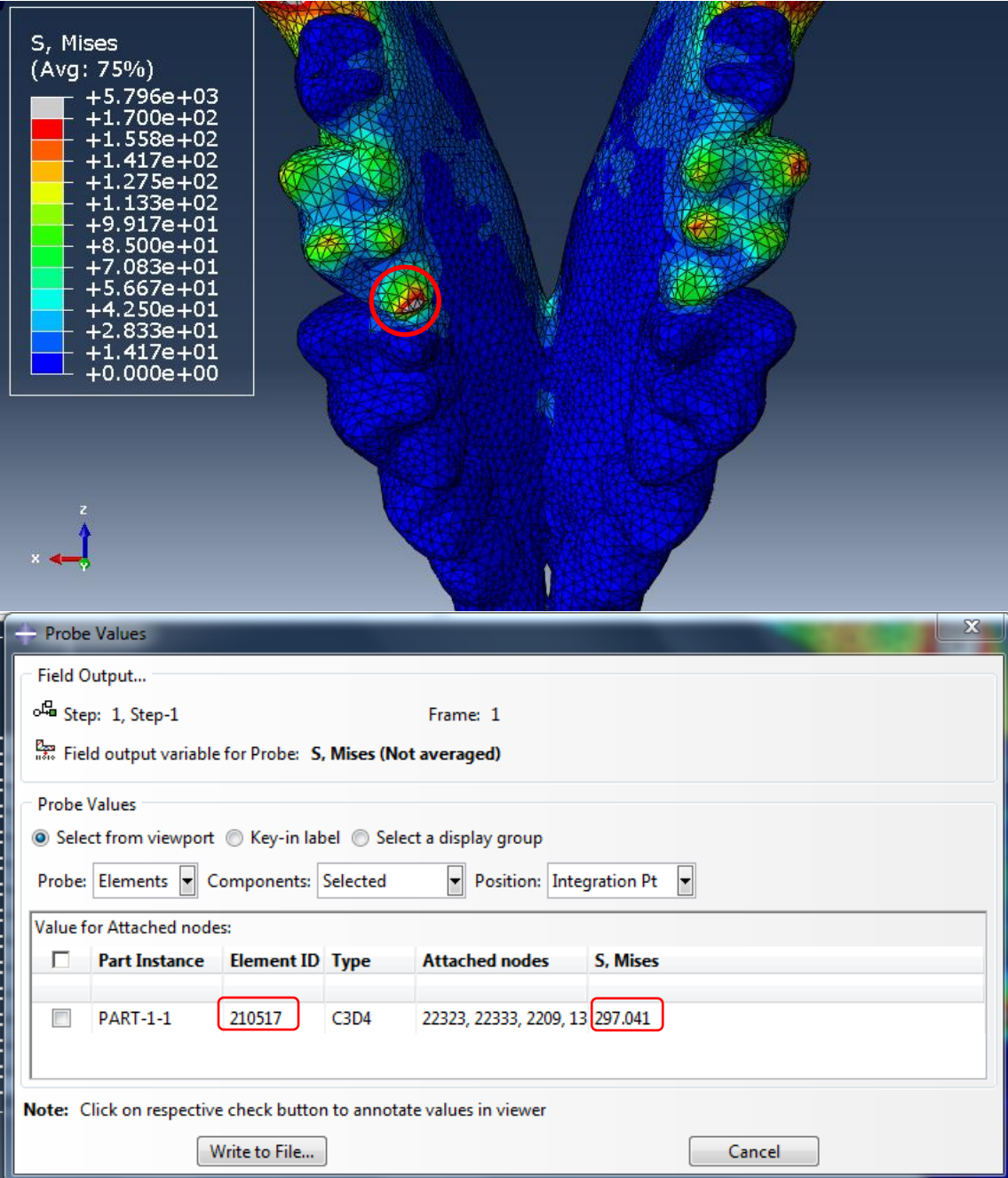


Figura 63. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Blarina* cuando actúa una carga de 100N sobre sus segundos molares y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises.

La tensión máxima de von Mises es de 297,04 MPa y se produce en la zona señalada en la imagen superior (elemento 210517).

Tensiones Carga sobre los Molares M3:

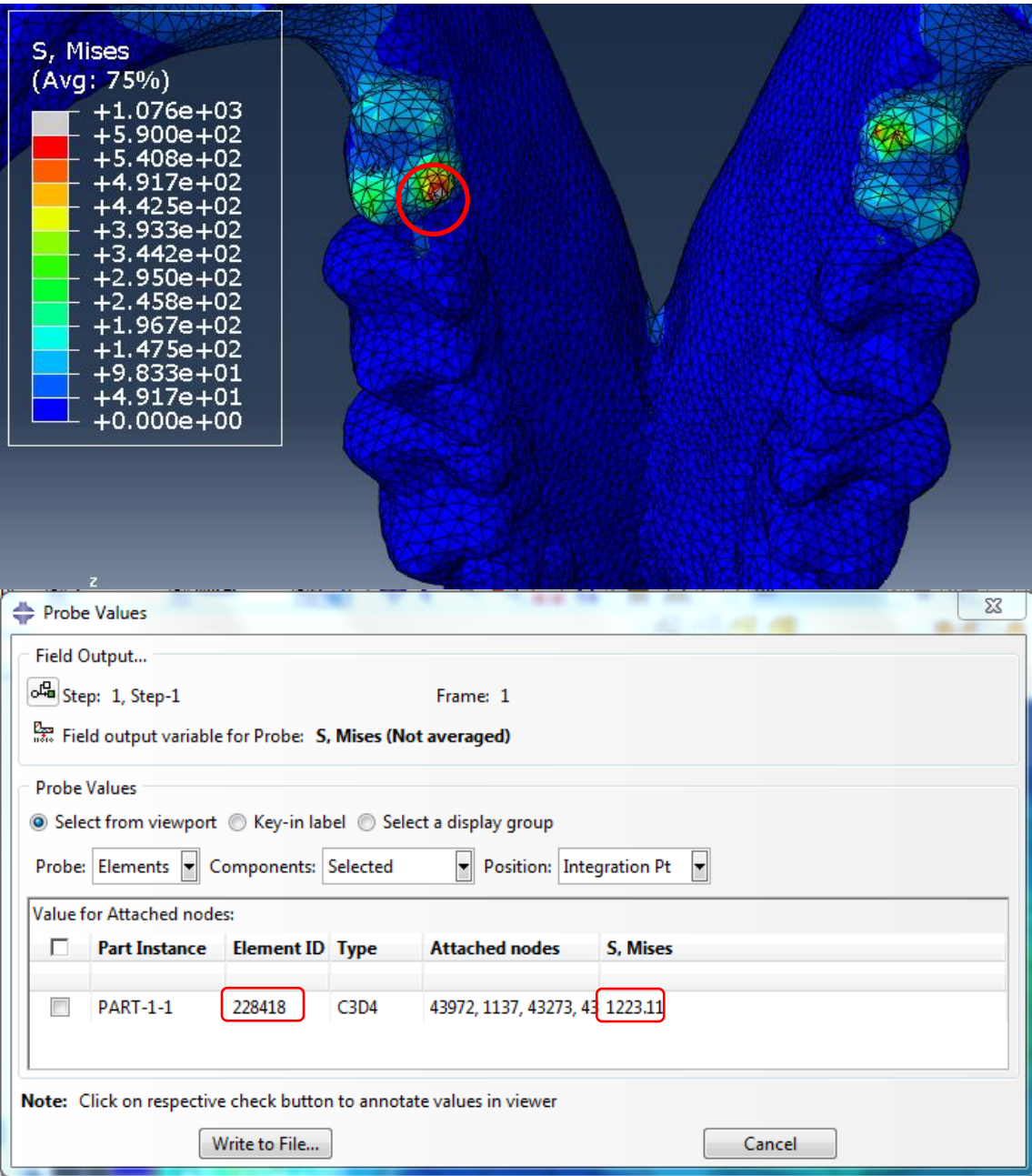


Figura 64. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Blarina* cuando actúa una carga de 100N sobre sus terceros molares y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises.

En el último caso la tensión máxima de von Mises es de 1223.11 MPa en la región indicada en la figura 63.

Se va a proceder a continuación, del mismo modo que para el ejemplar *Blarina*, a mostrar el estado tensional según el molar sobre el que está actuando la carga en el **ejemplar *Dolinasorex glyphodon***, la tensión máxima de von Mises a modo comparativo y la zona dónde esta se produce.

Se muestra en la siguiente imagen los tres molares sobre los que se van a aplicar las cargas por separado:



Figura 65. Identificación de los tres molares del ejemplar *Dolinasorex glyphodon*.

El modelo que se va a utilizar para este análisis es el mismo mencionado en la memoria, y solo variará la carga en función del caso que se esté analizando.

Tensiones Carga sobre los Molares M1:

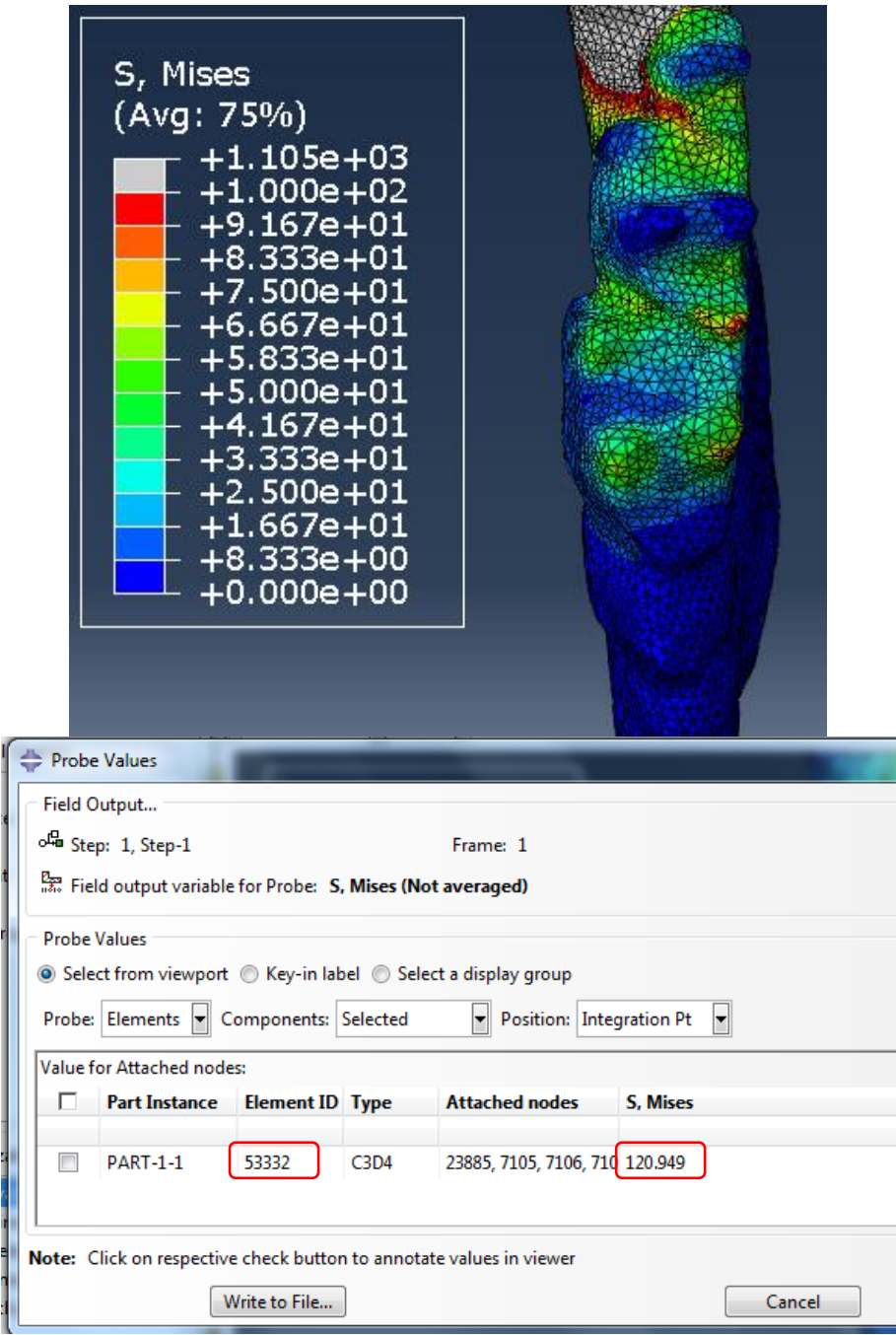


Figura 66. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Dolinasorex glyphodon* cuando actúa una carga de 50N sobre su primer molar y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises.

La tensión máxima de von Mises se registra en el elemento 53332, y su valor es de 120,95 MPa (fig. 66).

Tensiones Carga sobre los Molares M2:

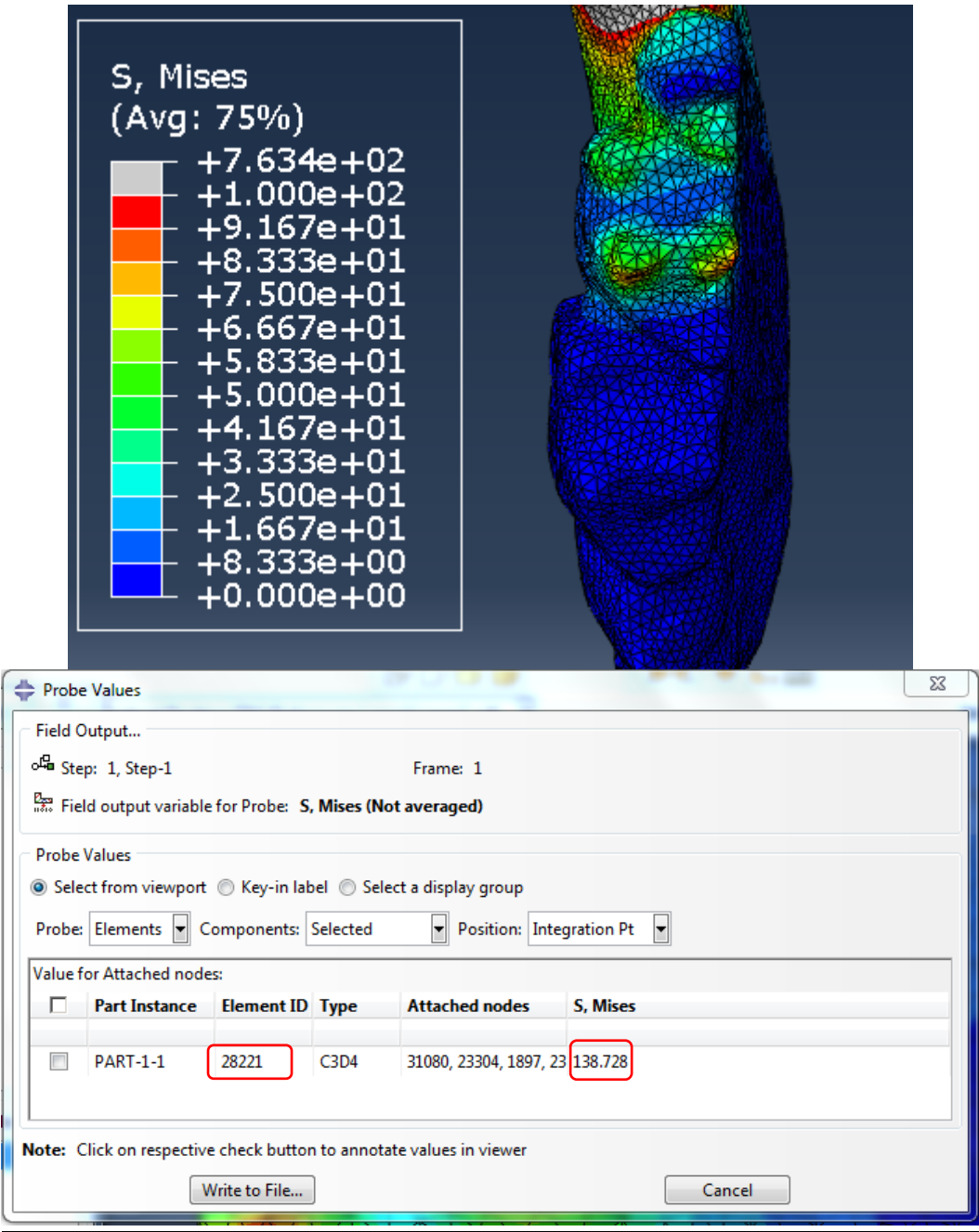


Figura 67. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Dolinasorex glyphodon* cuando actúa una carga de 50N sobre su segundo molar y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises.

En este caso, la tensión máxima de von Mises es de 138,73 MPa y se registra en el elemento 28221 (fig. 67).

Tensiones Carga sobre los Molares M3:

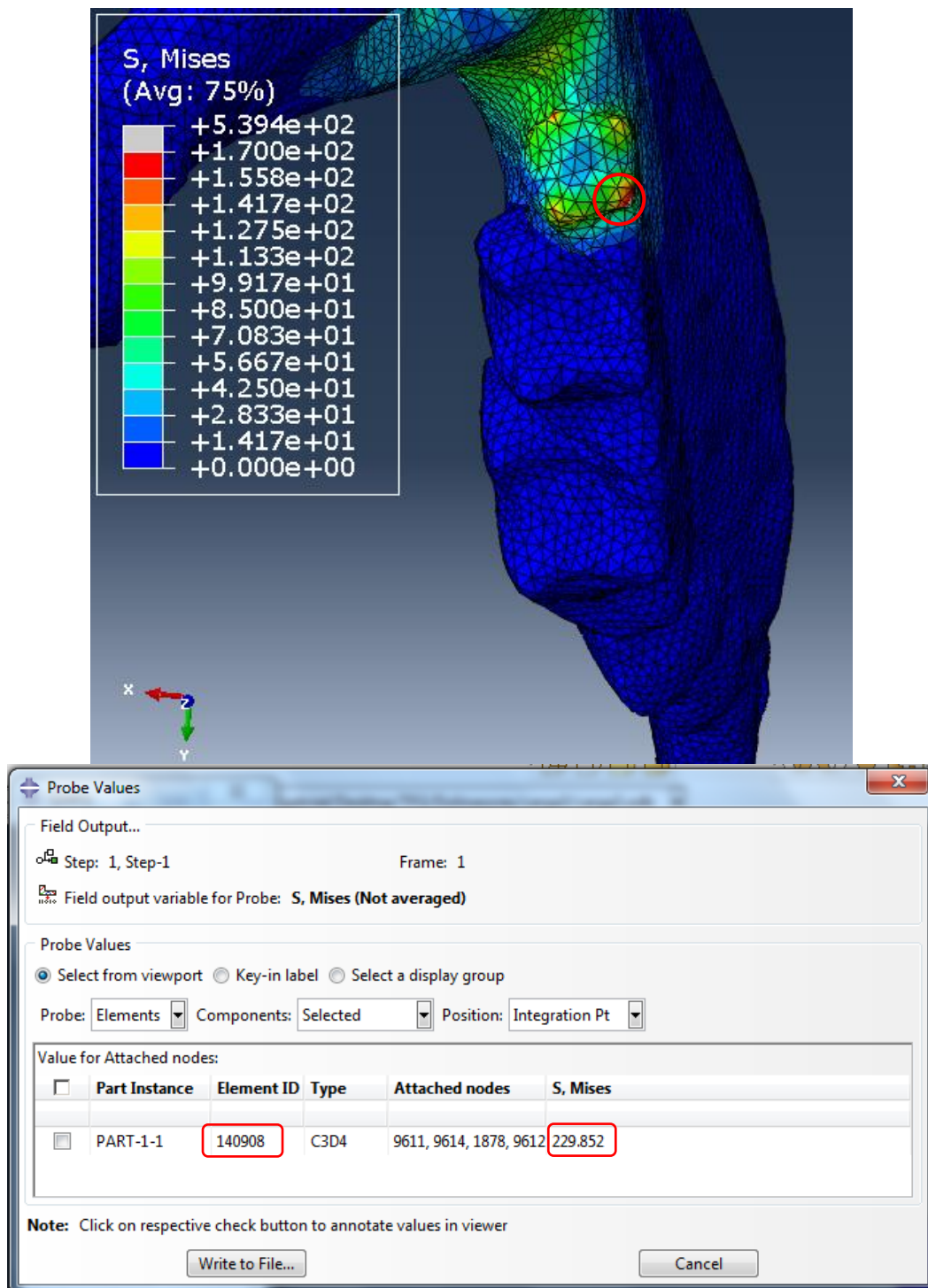


Figura 68. Estado tensional de la mandíbula del modelo *Dolinasorex glyphodon* cuando actúa una carga de 50N sobre su tercer molar y elemento del modelo donde se registra la mayor tensión de von Mises.

En el último caso, la tensión de von Mises es de 229.85 MPa, y se da en el elemento cuya ID es 140908.

Como se explica en la memoria, estos resultados pueden ser de utilidad cuando se obtenga de manera empírica la fuerza de mordedura real, ya que las tensiones que se han

generado son proporcionales a las fuerzas que las producen, siempre dentro de la hipótesis elástico lineal.