



## Trabajo Fin de Grado

Simulación computacional de la retracción que se produce en el cocinado de la carne mediante modelos multifísicos

Computational simulation of meat shrinkage during the cooking process using multiphysic models

Autor

José Ángel Bernad Pérez

Director

Jorge Grasa Orús

Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2019

## RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado se enmarca dentro de un proyecto de colaboración entre la Universidad de Zaragoza y la empresa B\ S\ H Electrodomésticos España. La evolución hacia futuros hogares inteligentes en los que los distintos electrodomésticos y más concretamente las cocinas de inducción, puedan incorporar funciones de ayuda al usuario de cara a mejorar el cocinado de diferentes productos, ha sido la motivación de este TFG.

En el trabajo se ha implementado un modelo numérico que permite simular los principales fenómenos físicos que tienen lugar durante el cocinado en plancha de carne de ternera: transferencia de calor desde el recipiente al alimento, la transferencia de humedad y el cambio de dimensiones como consecuencia de dicha pérdida de humedad.

La calidad de los resultados numéricos obtenidos depende de la adecuada caracterización de los diferentes parámetros que intervienen en el modelo numérico. En este caso, han sido obtenidos por el Grupo de Alimentos de Origen Vegetal de la Facultad de Veterinaria. Las simulaciones realizadas han permitido analizar y cuantificar la influencia de diferentes factores en el cocinado como por ejemplo: el espesor del filete, las condiciones iniciales de temperatura o la constante de transferencia de calor entre la sartén y el filete.

También se ha planteado una metodología de medida de la retracción de la pieza de carne, basada en visión por ordenador, para poder validar los resultados de la simulación comparando los resultados numéricos con los experimentales, obtenidos mediante el cocinado.

El trabajo desarrollado en el TFG se podría extender realizando un cálculo masivo de situaciones para posteriormente mediante redes neuronales u otras herramientas, poder implementar este conocimiento en las cocinas de inducción del grupo B\ S\ H, de cara a facilitar el cocinado al usuario, por ejemplo, incorporando sistemas de control que establezcan la potencia a suministrar para alcanzar la temperatura adecuada en el recipiente, o establecer el tiempo necesario en función de la apariencia externa y punto de cocinado deseado.

## AGRADECIMIENTOS

Como preámbulo a este Trabajo Fin de Grado (TFG) quiero agradecer su apoyo y colaboración a todas aquellas personas que lo han hecho posible.

En primer lugar, agradecer a Don Jorge Grasa Orús, Director de este Proyecto Final de Grado, su interés y esfuerzo constantes. Sin duda alguna su labor y apoyo durante éstos meses han sido esenciales para la consecución de este proyecto.

En segundo lugar, quiero agradecer a Don Miguel Ángel Martínez Barca, Don Andrés Mena Tobar y a Don Javier Escuer Gracia, miembros del Grupo de Applied Mechanics and Bioengineering del Departamento de Mecánica, su esfuerzo y su colaboración conmigo siempre que ha sido necesario.

Hacer una mención especial para Doña Begoña Calvo Calzada, quién fue la que pensó en mí para embarcarme en este proyecto, y que en todo momento ha tenido conmigo un trato excelente y cercano, siempre dispuesta a resolver todos aquellos obstáculos que iban apareciendo semana tras semana.

Por otra parte, agradecer a la empresa B\S\H Electrodomésticos España la oportunidad que me ha brindado de colaborar en su trabajo de investigación. En especial a Don Sergio Llorente, responsable del Departamento de Predesarrollo de Inducción, por haber estado a mi lado todos estos meses de trabajo, aportando sus ideas y experiencia.

Tampoco podía faltar mi agradecimiento a Doña María Luisa Salvador y Doña Silvia Lorente, profesoras del grupo de Investigación de Alimentos de Origen Vegetal de la Universidad de Zaragoza, quienes han aportado sus conocimientos en materia de alimentos cárnicos y su tiempo en la realización de ensayos.

Por último, no puedo terminar estas líneas sin agradecer a mi familia su apoyo incondicional. Ellos han hecho posible que haya llegado hasta aquí al dedicar buena parte de su vida y recursos a mi formación y desarrollo personal.

A todos ellos, muchas gracias.



# ÍNDICE GENERAL

Resumen . . . . .	II
Agradecimientos . . . . .	III
ÍNDICE GENERAL	VI
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	5
1.3. Contenidos . . . . .	8
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>9</b>
2.1. Naturaleza de la carne y estructura interna . . . . .	9
2.2. Estado del arte en la simulación de la retracción en el cocinado de la carne . . . . .	13
2.3. Física del cocinado de la carne . . . . .	14
2.3.1. Transferencia de masa . . . . .	16
2.3.1.1. Definición de variables y ecuaciones de conservación de masa . . . . .	16
2.3.1.2. Desnaturalización de las proteínas . . . . .	19
2.3.1.3. Ecuaciones de transferencia de masa . . . . .	20
2.3.2. Transferencia de calor . . . . .	22
2.4. Formulación de la mecánica del sólido deformable . . . . .	23
2.4.1. Análisis de grandes deformaciones . . . . .	23
2.4.2. Ecuaciones de equilibrio . . . . .	24
2.4.3. Ley constitutiva . . . . .	25
2.5. Condiciones de contorno . . . . .	27
2.5.1. Condiciones de contorno para la transferencia de humedad . . . . .	27
2.5.1.1. Flujos por evaporación . . . . .	28

2.5.1.2.	Flujos por goteo (drip) . . . . .	28
2.5.2.	Condiciones de contorno para la transferencia de calor . . . . .	29
2.5.3.	Condiciones de contorno para la mecánica del sólido . . . . .	30
2.6.	Parámetros . . . . .	31
2.6.1.	Cálculo de las propiedades térmicas del producto . . . . .	31
2.6.2.	Parámetros de la carne obtenidos experimentalmente: capacidad de retención de agua y modulo elástico . . . . .	32
2.6.3.	Resumen de variables y parámetros . . . . .	33
<b>3.</b>	<b>SIMULACIÓN DEL MODELO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL</b>	<b>37</b>
3.1.	Modelo de elementos finitos . . . . .	37
3.2.	Modelo 2D axisimétrico . . . . .	39
3.2.1.	Simulación del modelo . . . . .	39
3.2.2.	Validación del modelo . . . . .	43
3.3.	Modelo 3D con geometría simplificada . . . . .	47
3.3.1.	Simulación del modelo . . . . .	47
3.3.2.	Validación del modelo . . . . .	51
3.4.	Modelo 3D con geometría realista . . . . .	56
3.4.1.	Simulación del modelo . . . . .	56
3.4.2.	Validación del modelo . . . . .	57
3.5.	Efecto de los parámetros de la carne sobre los resultados . . . . .	62
3.5.1.	Efecto de la temperatura exterior . . . . .	62
3.5.2.	Efecto del contacto térmico entre la carne y la sartén . . . . .	64
3.5.3.	Efecto del espesor de la carne . . . . .	65
3.5.4.	Efecto de la difusividad . . . . .	67
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS</b>	<b>69</b>
4.1.	Conclusiones . . . . .	69
4.2.	Líneas futuras . . . . .	71
<b>Anexos</b>		<b>75</b>
<b>A.</b>	<b>ENSAYOS EXPERIMENTALES DEL COCINADO EN CARNE</b>	<b>77</b>
A.1.	Equipos utilizados . . . . .	77
A.2.	Medida de la retracción . . . . .	79
A.2.1.	Montaje . . . . .	79
A.2.2.	Software de visión por ordenador . . . . .	80
A.2.3.	Resultados . . . . .	80
A.3.	Escáner de las geometrías realistas . . . . .	82

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

Este Trabajo de Fin de Grado se enmarca dentro de un proyecto Retos de investigación en el que colaboran diferentes grupos de la Universidad de Zaragoza y la empresa B\S\H Electrodomésticos España (*RTC-2017-5965-6, ARQUE*). Concretamente se ha trabajado con los grupos: *Grupo T24-17R de Applied Mechanics and Bioengineering* de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura y el *Grupo T07-17R de Alimentos de Origen Vegetal* de la Facultad de Veterinaria en las tareas relacionadas con la simulación numérica del cocinado.

El extraordinario avance de la tecnología y su universalización en los últimos años, ha permitido que ésta abarque a día de hoy buena parte de los aspectos de la vida cotidiana. El máximo exponente en el día a día de las personas son los teléfonos móviles. Como respuesta a esta realidad, las empresas y los grandes grupos tecnológicos han sabido identificarla, y tienen la intención de desarrollar sistemas que conecten estos dispositivos con todo aquello que nos rodea, empezando porque no, por el propio hogar, el entorno donde lo que precisamente se busca es la comodidad.

La sociedad se dirige hacia futuros hogares inteligentes conectados, en los que se podrá manejar todos los electrodomésticos desde la pantalla del *smartphone*. Por eso el grupo B\S\H en colaboración con la Universidad de Zaragoza, lleva varios años trabajando para aplicarlo a las cocinas de inducción a fin de buscar la máxima eficiencia de los equipos, así como un cocinado asistido como parte del hogar inteligente. Ejemplo de ello es el sistema *Home connect* de la compañía, que a través de la aplicación para *smartphones* y el asistente de cocina *Mykie*, permiten dar instrucciones por voz y controlar los distintos equipos, todo ello con unos pocos toques

en la pantalla (figura 1.1).



(a) Aplicación *Home connect*.

(b) Asistente de cocina *Mykie*.

Figura 1.1: Sistema *Home connect* del grupo B\S\H.

Sin embargo, la conectividad no es más que uno de los objetivos que se pretende alcanzar. También se está trabajando en desarrollar un cocinado guiado semi autónomo, de alta calidad y eficiente energéticamente, que permita al consumidor tomar decisiones correctas a la hora de seleccionar la técnica y los parámetros de cocinado más adecuados.

A día de hoy, las marcas del grupo B\S\H ya comercializan equipos de cocina en los que es posible seleccionar el alimento que se va a cocinar para que a continuación se regulen algunos parámetros de cocinado. Sin embargo, para poder establecer aquellas condiciones que aseguran el punto óptimo de cocinado, en las que se garantiza la máxima calidad, es necesario desarrollar modelos numéricos capaces de modelar no sólo el proceso de cocinado, sino también aquellos fenómenos relacionados con la propia calidad.

## 1.1. Motivación

El desarrollo de modelos numéricos para la simulación del cocinado de alimentos, representa una gran ventaja frente a la experimentación tradicional. El análisis computacional de los procesos supone un ahorro de tiempo y dinero a la hora de recabar los datos necesarios para caracterizar el cocinado de los alimentos. Un buen punto de partida es la simulación del cocinado de carne, al tratarse de un proceso sencillo y en el que se pueden tener en cuenta distintos orígenes animales, formatos de la



pieza o condiciones del cocinado con tan solo ajustar unas pocas propiedades del modelo.

Además, no hay que olvidar que el siguiente paso tras la simulación numérica, será implementarlo en cocinas inteligentes con interfaz de usuario que permitan optimizar y guiar el cocinado. En este sentido, la ventaja que suponen estos modelos numéricos, es la de tener acceso a todas las variables que intervienen en el cocinado en cualquier punto de la pieza cocinada y en cualquier instante de tiempo. Esto permitiría llegar a crear un sistema realimentado, que con la ayuda de sensores y la información de los modelos, la propia cocina fuese capaz de recalculiar la potencia suministrada en base a como estuviera teniendo lugar hasta ese momento, con el fin de garantizar la máxima calidad.

En este punto surge la necesidad de introducir en los modelos aquellos fenómenos indicadores de la calidad, como son el color y la retracción, siendo éste último el eje central del actual trabajo.



Figura 1.2: Comparativa del trozo de ternera antes (a) y después del cocinado (b).

La retracción es el cambio de las dimensiones del producto durante el proceso de cocinado. Para hacerse una idea acerca del fenómeno, se puede observar la figura 1.2. El consumidor puede concluir que una cierta retracción de la carne, puede ser un indicador de calidad baja, a consecuencia de un excesivo contenido de agua o el efecto de tratamientos hormonales en el animal. Además, características como la apariencia o el tamaño de un filete pueden llegar a influir en el precio. Por ello la alteración del tamaño debido a la retracción predispone desfavorablemente al consumidor de cara al producto, o ante la posibilidad de volver a consumirlo o cocinarlo de una cierta manera. Al fin y al cabo, el usuario de una cocina se puede hacer una idea del grado de cocinado que esta adquiriendo la carne en base a cuánto se ha encogido la pieza.

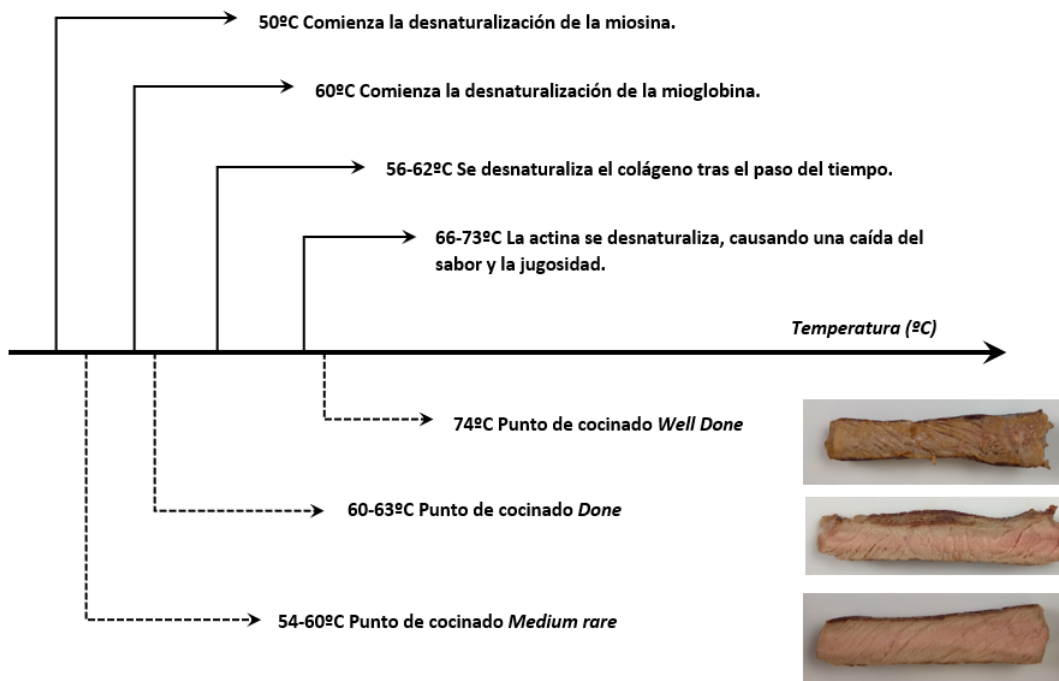


Figura 1.3: Escala térmica donde se comparan las temperaturas de desnaturalización de las proteínas presentes en la carne de ternera y las temperaturas en el punto central para distintos puntos de cocinado. A la derecha, imágenes tomadas durante la fase experimental de cada punto de cocinado.

Además, desde el punto de vista de la calidad se pueden relacionar el contenido de humedad de la carne y la retracción que aparece. Ambas tienen que ver con el proceso que sufren las proteínas durante el calentamiento, denominado desnaturalización, y que se explicará en profundidad en el apartado 2.1. En la figura 1.3 se muestra la comparativa, conforme avanza la temperatura, de los instantes en los que cada proteína empieza a desnaturalizarse y los puntos de cocinado más habituales de la carne de ternera. Desde la perspectiva culinaria, la actina y la miosina, dos proteínas presentes en la carne, son las que tienen un mayor interés. La percepción de una carne cocinada seca, no tiene tanto que ver con la falta de humedad en su interior, sino más bien con que ha comenzado el proceso de desnaturalización de la actina. Es por eso que la mayoría de las personas prefieren aquellos puntos de cocinado de la ternera en los que la miosina ya se ha desnaturalizado y todavía no lo ha hecho la actina.

Con todo esto, se pretende mostrar que parámetros como la pérdida de peso

durante el cocinado, la ternura (*tenderness*), la retracción o el color, son factores que están íntimamente relacionados a pesar de ser percibidos por el consumidor como fenómenos independientes.

El estudio de estos fenómenos supone así un punto extra, relevante de cara a la simulación del cocinado. El *Grupo T24-17R de Applied Mechanics and Bioengineering* comenzó con la simulación del cocinado de la carne en horno y plancha (Fuertes Bueno, 2018). Posteriormente se pudo validar un modelo del cocinado y del color en el trabajo de Pérez Salesa (2019). En este TFG se irá un paso más allá y se implementará por primera vez un modelo para el cocinado de carne en plancha que incluya además el fenómeno de la retracción.

## 1.2. Objetivos

El objetivo global de este proyecto es el de desarrollar una metodología numérica, que permita abordar la simulación computacional del fenómeno de la retracción durante el cocinado de carne en plancha (figura 1.4). Para ello se ha implementado el modelo numérico propuesto por Dhall and Datta (2011).

Para simular el proceso de cocinado en el que está presente este fenómeno, se ha de resolver un problema multifísico acoplado de transferencia de calor, transferencia de masa y de mecánica de sólidos. Por ello se ha optado por utilizar el software comercial COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> 5.2a.

La metodología implementada en este TFG será validada en base a distintas fuentes:

- Con resultados de la bibliografía, concretamente para el cocinado de hamburguesa en sartén por una cara, utilizando los resultados experimentales de Dhall and Datta (2011).
- El grupo de investigación de Alimentos de Origen Vegetal de la Universidad de Zaragoza ha llevado a cabo una serie de mediciones experimentales con ternera para el estudio de la calidad del cocinado en función del estado de la carne (fresca, congelada, madurada). Estos datos se emplearán para validar el modelo en lo que respecta a las temperaturas en distintos puntos y la pérdida de peso en ternera fresca.

- El fenómeno de la retracción se validará en base a visión por ordenador, a partir de las imágenes grabadas durante los experimentos mencionados en el punto anterior.

Además la medida cuantitativa y cualitativa de la retracción ha requerido desarrollar una metodología propia, basándose en la experiencia y el aprendizaje que ha supuesto estar presente durante los ensayos experimentales en la Facultad de Veterinaria.

De este modo, y con el fin de alcanzar el objetivo global, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Estudio del estado del arte de los principales procesos físicos que definen el problema del cocinado de la carne, y de los modelos numéricos ya utilizados para simular el cocinado y más concretamente la retracción.
- Implementación en COMSOL de las ecuaciones de transferencia de calor, transferencia de masa y de mecánica de sólidos particularizadas para el cocinado de carne.
- Simulación del proceso de retracción durante el cocinado en plancha para cocinas de inducción, en distintas geometrías (trozos de ternera, filete completo y hamburguesa).
- Obtención de geometrías realistas para la simulación, a partir del escáner en 3D de las piezas empleadas durante la fase experimental.
- Desarrollo de una metodología de medida durante los ensayos experimentales del fenómeno de la retracción.
- Análisis de los resultados numéricos obtenidos y su validación mediante la comparación con los resultados experimentales.

En resumen, este trabajo pretende ser el primero en el contexto de la colaboración de la Universidad de Zaragoza con el grupo B\S\H en el que se aborda el fenómeno de la retracción durante el cocinado de la carne, introduciendo la simulación de un fenómeno clave con gran influencia durante el cocinado y en el análisis de la calidad del producto.

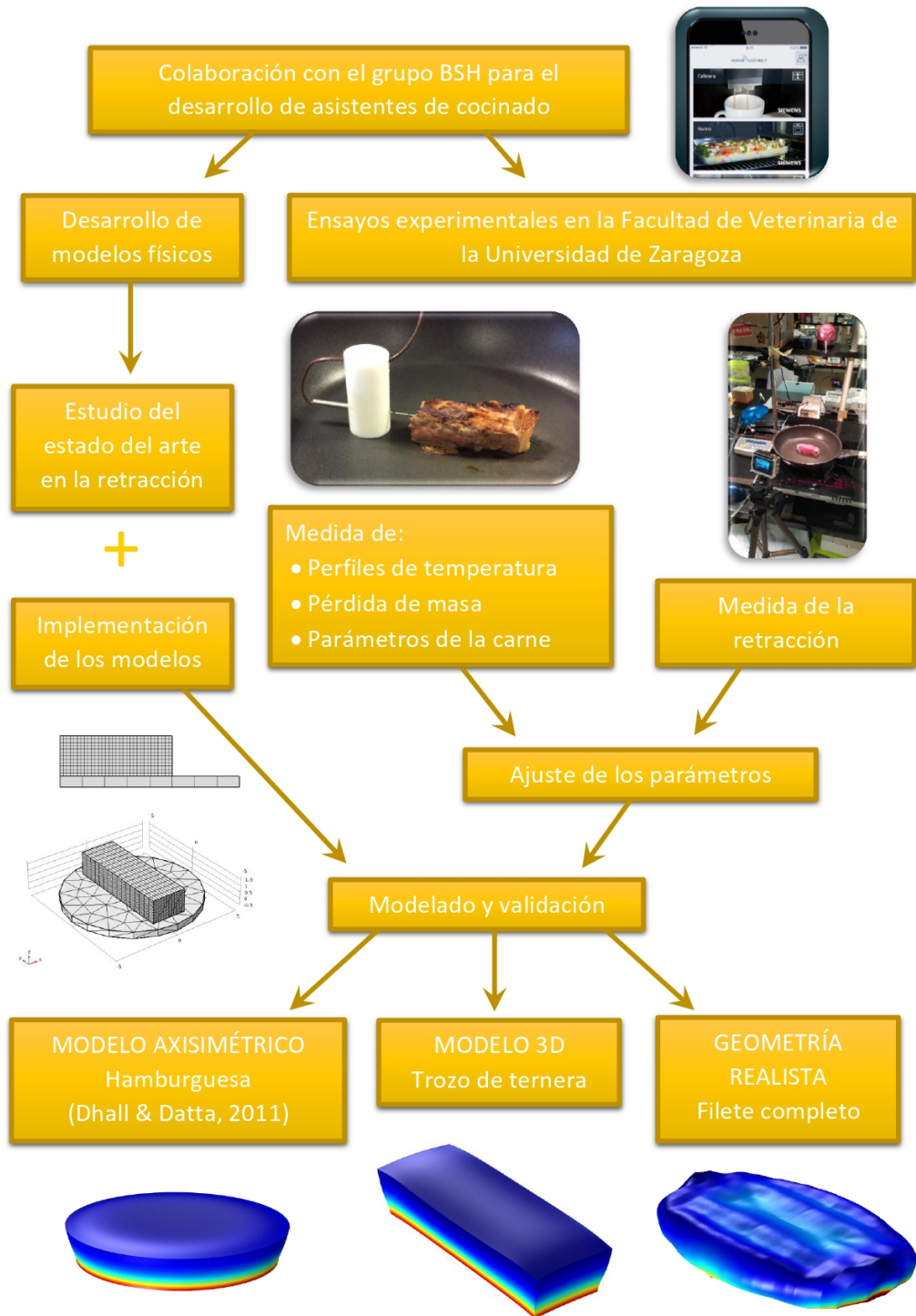


Figura 1.4: Esquema del desarrollo del Trabajo Final de Grado.

### 1.3. Contenidos

La memoria de este TFG está estructurada en cuatro capítulos y un apéndice. El primer capítulo es la introducción, donde se aborda la motivación y los objetivos de este trabajo. En el segundo se detallan los fundamentos teóricos para la creación del modelo numérico, desde el análisis de la naturaleza de la carne y su estructura interna hasta el estado del arte en la simulación de la retracción durante el cocinado de carne. También se introducen las ecuaciones físicas, condiciones de contorno y parámetros a emplear. El tercer capítulo se ha dedicado a la propia simulación, comentando los modelos creados, sus ajustes y los resultados obtenidos a partir de ellos. Se compararan dichos resultados con los valores de la bibliografía y con los obtenidos durante los ensayos experimentales. Por último, en el cuarto capítulo se exponen las conclusiones, así como algunas ideas de las futuras líneas de investigación que pueden partir de este proyecto. En el apéndice se explican las características de los ensayos experimentales realizados, así como la metodología desarrollada para la medida de la retracción durante el cocinado.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se van a describir, brevemente, las ecuaciones que permiten modelar los principales procesos que se producen durante el cocinado de carne, haciendo especial hincapié en el fenómeno de la retracción.

En primer lugar, se realizará una breve introducción a la naturaleza y estructura interna de la carne para poder comprender el origen del fenómeno de la retracción. También se procederá a hacer un estudio del estado del arte acerca de cómo se ha tratado habitualmente este tipo de problemas en la literatura. Posteriormente, se desarrollarán los fundamentos físicos y matemáticos del modelo seleccionado. Por último, se presentará la definición de los parámetros térmicos de la carne en función de sus constituyentes y de la temperatura.

### **2.1. Naturaleza de la carne y estructura interna**

Los alimentos en base a su textura final tras el cocinado y a los procesos que tienen lugar en su interior, se pueden clasificar en tres grupos, como se puede apreciar en la figura 2.1. Las categorías principales según Dhall and Datta (2011) son: los alimentos húmedos con textura gomosa, en los que la pérdida de humedad supone la principal causa de la retracción. En este grupo se clasifica la carne. Por otro lado están los alimentos con menor contenido de agua, con textura quebradiza en los que adquiere una mayor importancia la variación volumétrica debido a la fase vapor. Ejemplo de esta última categoría es el secado de la patata frita (Gulati and Datta, 2015). Y por último una tipología intermedia entre cada uno de ellos.

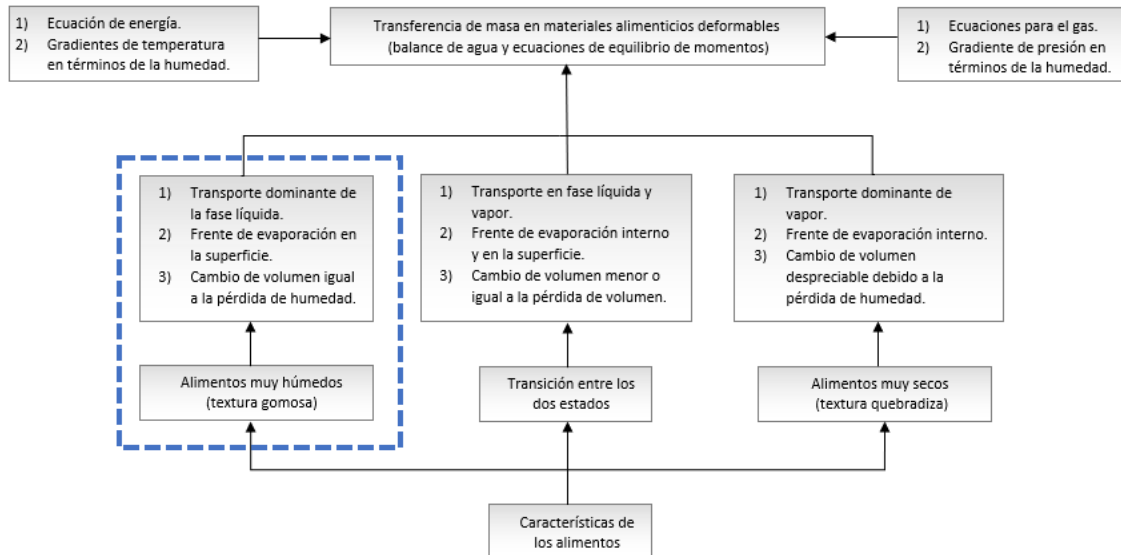


Figura 2.1: Esquema de las distintas tipologías de alimentos tras su cocinado y los fenómenos que lo rigen. Para el caso de la carne, la tipología corresponde a la enmarcada en el recuadro azul.

En este contexto, la carne está formada por agua en torno a un 70%-75% en peso, y puede llegar a perder durante el cocinado en algunos puntos hasta la mitad de su contenido inicial. El resto de componentes va en función del tipo de carne y ronda los valores recogidos en la figura 2.2. Por todo ello, se puede enmarcar la carne dentro del primer grupo de los alimentos con alto contenido en humedad, en los que la variación volumétrica durante el cocinado se debe en su integridad a la pérdida de agua.

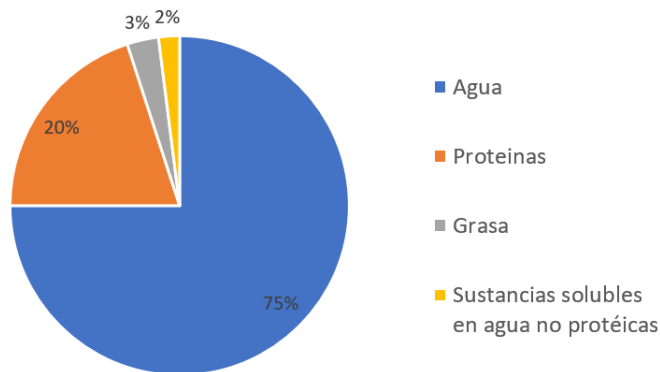


Figura 2.2: Porcentajes en peso de los componentes de la carne.



En lo que afecta al contenido de proteínas de la carne, éstas se pueden clasificar en tres grandes grupos: las proteínas miofibrilares son las que componen el tejido muscular y por tanto la estructura principal de la carne, y las más relevantes son la actina y la miosina; las proteínas estromales son las que forman el tejido conectivo entre las distintas fibras y la principal es el colágeno; y las proteínas sarcoplásmicas, presentes en la sangre, como la mioglobina, son las responsables del color rojizo de la carne, pero que sin embargo no resultan relevantes desde el punto de vista estructural.

Las primeras componen la estructura interna del músculo, y son las que aportan la consistencia y textura al producto. Atrapado dentro de esta estructura queda retenido el suero intracelular asociado a las proteínas y compuesto mayoritariamente por agua, y en menor proporción, por sales y sustancias no protéicas solubles en agua.

Las que componen el tejido conectivo, forman un epitelio que agrupa unas fibras con otras. En los poros que quedan entre estas estructuras se distribuye el suero extracelular, también denominado capilar. En la figura 2.3 se muestra un esquema de la estructura del tejido muscular.

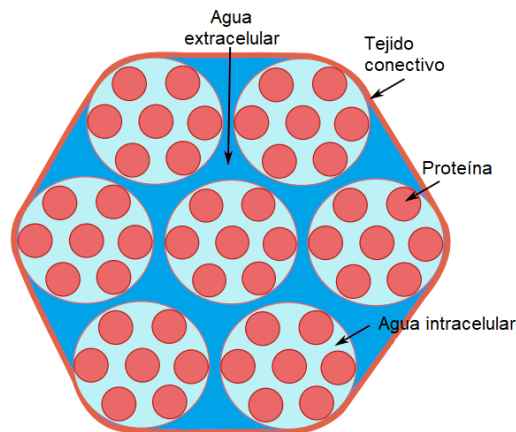


Figura 2.3: Estructura jerárquica del tejido muscular de la carne.

La estructura protéica del músculo es tridimensional, ya que se asume que esta configuración es la necesaria para la realización normal de sus funciones. Cuando ésta sufre un proceso de calentamiento, se dice que la proteína ha sufrido un proceso de desnaturalización, en el que la estructura adquiere una forma bidimensional (*estructura secundaria*). Estos cambios de forma en la proteína afectan también al sabor,

la textura y de forma más visual a la retracción de la carne.

En función del origen de la carne, ésta contiene unos tipos de proteína u otros y en distintas proporciones. Cada proteína comienza a desnaturalizarse a una temperatura concreta, lo cual influye de manera crucial en el resultado del cocinado.

El proceso de desnaturalización de la carne de ternera comienza a unos  $35^{\circ}\text{C}$  con la retracción transversal de las fibras que componen la estructura protéica, pero se intensifica en el rango de los  $40\text{-}60^{\circ}\text{C}$ , cuando disminuye el área de la sección de las fibras y se libera el suero intracelular (figura 2.4). A los  $60\text{-}70^{\circ}\text{C}$  el tejido conectivo se encoge longitudinalmente, y el suero extracelular es expelido al ambiente. A temperaturas superiores a  $90^{\circ}\text{C}$ , el contenido de agua que queda en la carne permanece, ya que este porcentaje de humedad, en torno a la mitad del contenido inicial, queda asociado a las proteínas (Barbera and Tassone, 2006).

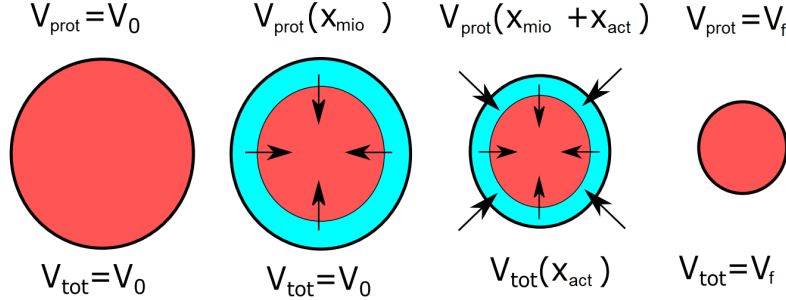


Figura 2.4: Esquema de la evolución de la retracción transversal de las fibras y de la liberación del suero intracelular.  $V_{tot}$  representa el área total de la sección de la fibra (proteína y suero),  $V_{prot}$  la fracción de ésta que corresponde solamente a proteína, de la cual  $X_{mio}$  y  $X_{act}$  son las fracciones de miosina y actina respectivamente.  $V_f$  es el área tras haberse liberado buena parte del suero retenido. Al calentar, primero comienza a desnaturalizarse la miosina. Cuando se alcanza la temperatura tal que la actina empieza a desnaturalizarse, se libera el suero intracelular hasta que solo queda el suero asociado a las proteínas.

La forma en que se modelan todos los procesos relacionados con la desnaturalización de las proteínas, se explicará en la subsección 2.3.1.2 de la sección de *transferencia de masa*.

## 2.2. Estado del arte en la simulación de la retracción en el cocinado de la carne

Los procesos físicos en cualquier forma de cocinado se basan en el transporte de energía y humedad en un medio deformable (Datta, 2007). A pesar de que el estudio de transporte de especies en medios deformables ha sido ampliamente tratado en materiales no alimenticios como geomateriales (suelos, materiales rocosos o cerámicos), geles o polímeros, la especificidad de sus características (consistencia, higroscopicidad o la transición a distintas fases) convierten a los alimentos y más concretamente a los productos cárnicos, en un objeto complejo de estudio que no ha sido especialmente tratado en bibliografía.

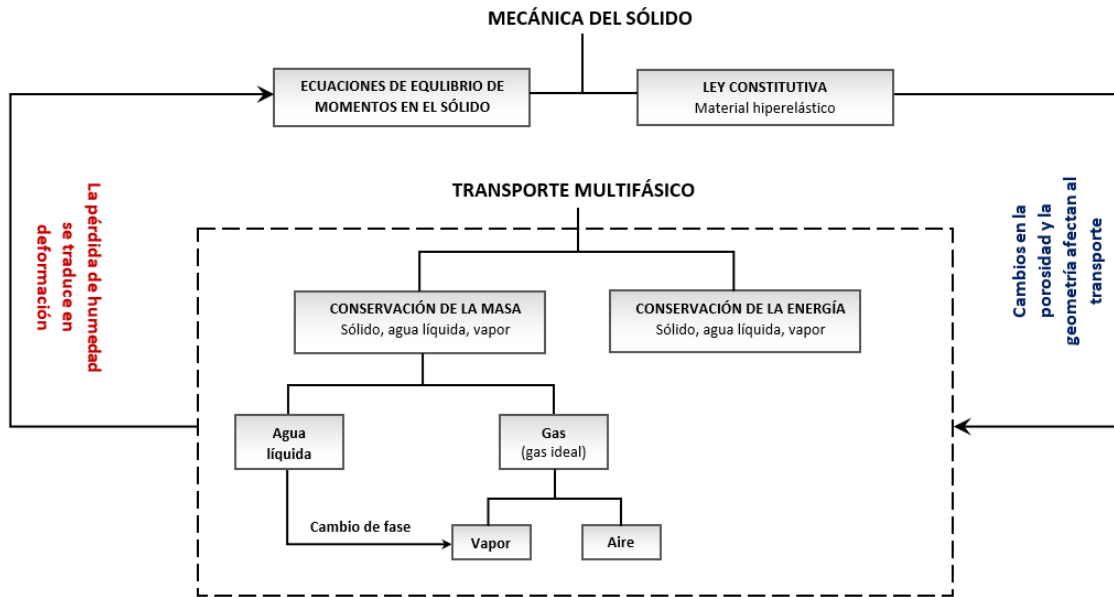


Figura 2.5: Acoplamiento de las físicas del transporte multifásico y de la mecánica de sólidos.

La mayoría de los modelos actuales de transporte para alimentos se ciñen a curvas basadas en datos empíricos, (Ikedia et al., 1996; Fowler and Bejan, 1991), o en versiones mejoradas, los denominados *modelos fenomenológicos*, que asumen un modelo puramente conductivo de transferencia de calor para la energía y puramente difusivo para el transporte de humedad, resolviendo una ecuación para la conducción y otra para la difusión durante el transitorio, haciendo uso de parámetros de conductividad y difusividad efectiva experimentales (Goñi and Salvadori, 2010; Kondjoyan, 2006). Estos últimos modelos no consideran el transporte de agua por convección debido a

la presión que ejerce la retracción de la red de proteínas, algo que sí se considera en los *modelos físicos* (Datta, 2007; Feyissa et al., 2013; Van der Sman, 2013). Esta forma de transporte depende de la pieza de carne y tiene en cuenta propiedades como la permeabilidad y el módulo elástico del músculo, no consideradas en los modelos previos. Sin embargo, los modelos físicos indicados previamente, desprecian la variación de volumen del alimento, por lo que no llevan a cabo el acoplamiento con los modelos de mecánica de sólidos (texto en rojo y azul de la figura 2.5).

Una descripción del cocinado basada en la deformación del material es todavía menos frecuente que una descripción detallada del transporte en sí mismo (figura 2.5). Existen dos corrientes fundamentales en el modelado de la retracción: por un lado aquellos modelos en los que los datos de retracción experimentales se ajustan en función de los valores del contenido de la humedad o los volúmenes aditivos de los distintos componentes. Esta información se emplea para predecir la deformación a partir de la pérdida de humedad (Mayor and Sereno, 2004; Katekawa and Silva, 2006). Por otro lado están aquellos que modelan el transporte en alimentos deformables como un problema de mecánica de sólidos y resuelven las ecuaciones de equilibrio de momentos para la matriz sólida. Éste planteamiento ha sido aplicado en Gulati and Datta (2015) para el *puffing* del grano de arroz, Zhang et al. (2005) para el cocinado en horno del pan y Dhall and Datta (2011) para el cocinado de la hamburguesa y el secado del snack de patata.

En este contexto, el actual TFG es un intento de desarrollar un modelado basado en un marco poromecánico para las físicas de transporte de humedad, transferencia de calor y mecánica del sólido en el cocinado de productos cárnicos. Se ha optado por implementar en COMSOL uno de estos modelos, concretamente el propuesto por Dhall and Datta (2011), basado en un modelo de grandes deformaciones.

### 2.3. Física del cocinado de la carne

Los procesos que rigen el cocinado de la carne, y en especial la manera en que éstos se manifiestan en forma de cambios físicos y químicos, vienen fuertemente influidos por el tipo de animal, corte, estado de maduración y estado de conservación de la muestra tomada. Sin embargo, a grandes rasgos, los fenómenos internos que ocurren durante el cocinado en plancha de unos y otros vienen a ser comunes.

La carne está formada fundamentalmente por agua y proteínas, y en menor medida, por otros componentes (grasa, carbohidratos). El agua sin embargo, queda confinada dentro de la propia red protéica. Ésta configuración, así como sus propiedades termofísicas, permiten tratar a la carne como un material cuya matriz sólida está saturada en contenido de agua.

Durante el cocinado en plancha se transmite calor al alimento por contacto con la superficie de la sartén, la cual ha adquirido una temperatura por medio de la distribución de potencia en el sistema de inducción. La temperatura de la sartén, gracias al sistema de control de la cocina de inducción empleada en la fase experimental, se mantiene constante durante el cocinado en 215°C. Es por ello que el presente TFG, no va a incluir la distribución de potencia generada por inducción en la sartén.

Durante el caletamiento, se va produciendo la desnaturalización de las proteínas. Como se verá más adelante en el apartado 2.3.1.2, este proceso libera el agua de la red y lleva consigo también la retracción de las fibras que forman la matriz, lo cual genera unos gradientes de presión que se traducen en el transporte del agua por el interior de la carne. Esta retracción de las fibras es la que se aprecia a escala macroscópica en toda la pieza de la carne, según avanza el cocinado. El agua libre que llega a la superficie se expelle de dos maneras: por evaporación al encontrarse a temperaturas superiores a 100°C en puntos próximos a la sartén, proceso que absorbe gran energía; o por medio de goteo o *drip*, sobre todo en las paredes laterales en las que la temperatura no es tan alta (figura 2.6). Las consecuencias de la pérdida desigual de agua en las distintas partes de la carne, se traduce en una mayor retracción en aquellas zonas donde los flujos son mayores.

El cocinado de la carne se puede modelar mediante un problema donde es necesario acoplar tres físicas: transferencia de calor, transferencia de masa y la mecánica del sólido (figura 2.5). El modelo a implementar en este TFG está basado en los modelos recogidos en la bibliografía realizados por Dhall and Datta (2011). El modelo se implementa en el software COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> 5.2a, basado en el cálculo por el método de elementos finitos (FEM). En este software podemos implementar directamente las ecuaciones a resolver, así como las condiciones iniciales y de contorno y las geometrías realistas de los alimentos a modelar, en este caso, del filete de ternera, obtenidas mediante visión por computador del alimento.

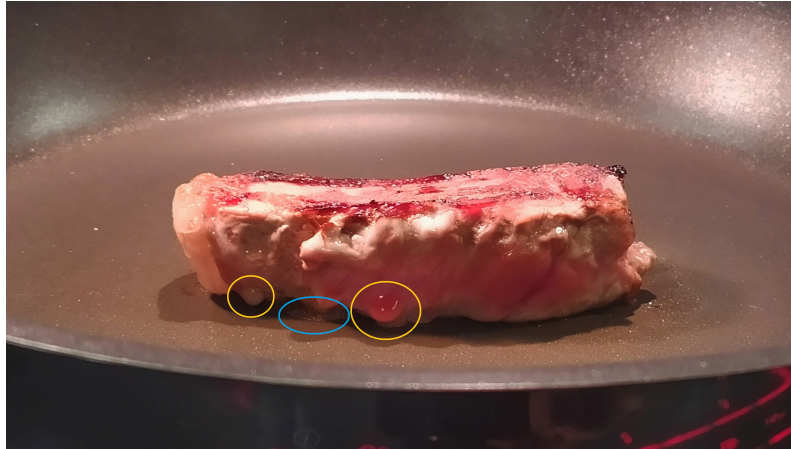


Figura 2.6: Imagen tomada durante la experimentación con trozos de ternera. En la superficie inferior se observan las burbujas del agua que se ha evaporado (círculo azul), y en las zonas de la pared, gotas de agua (círculos amarillos).

A continuación se procede a describir brevemente las ecuaciones implementadas para cada una de las físicas que rigen el cocinado de carne mediante plancha.

### 2.3.1. Transferencia de masa

#### 2.3.1.1. Definición de variables y ecuaciones de conservación de masa

El modelado del cocinado de un alimento considerando su deformación, como se ha podido apreciar en el apartado del estado del arte, ha sido habitualmente tratado en la bibliografía para distintos alimentos como un medio poroso multifásico. En la figura 2.7 se muestra la disposición teórica de las distintas fases presentes en el alimento. En el caso general, se considera el transporte de dos fases, agua líquida y gas, ésta última formada por vapor de agua y aire, en un medio poroso no saturado.

Una de las variables con la que se va a trabajar en el desarrollo de los fundamentos teóricos, es la porosidad del producto,  $\phi$ . Ésta, representa la fracción volumétrica que ocupan la fase líquida y gaseosa respecto al volumen total  $V_T$ , el cual se define como la suma de los volúmenes de todos los componentes: del agua ( $V_w$ ), de la matriz sólida ( $V_s$ ) y del gas ( $V_g$ ). En lo sucesivo, se hará referencia al volumen total de carne y fluidos como *producto*.

$$V_T = V_w + V_s + V_g \quad (2.1)$$

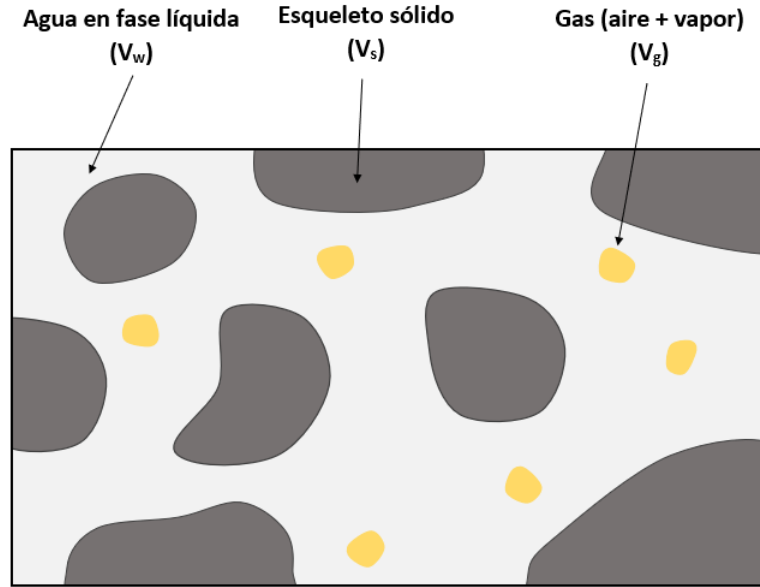


Figura 2.7: Esquema de la estructura del alimento en el que se muestran las distintas fases presentes y la nomenclatura para los respectivos volúmenes de cada una.

$$\phi = \frac{V_w + V_g}{V_T} \quad (2.2)$$

Análogamente, se pueden definir las fracciones volumétricas de cada componente por separado:

$$\varepsilon_w = \frac{V_w}{V_T} \quad \varepsilon_g = \frac{V_g}{V_T} \quad \varepsilon_s = \frac{V_s}{V_T} \quad (2.3)$$

La fracción volumétrica de la fase sólida se puede expresar también en función de la porosidad:

$$\varepsilon_s = 1 - \phi \quad (2.4)$$

Estas variables serán posteriormente empleadas para calcular las propiedades del producto en cada instante de tiempo, en función del contenido de cada componente (sección 2.6).

Otra variable del problema, que en este caso se obtiene actualizando a lo largo de la simulación, es la concentración de las especies,  $c_i$ , que expresa los  $kg$  que hay de la misma por  $m^3$  de producto. Resulta interesante definir también la variable  $M$ , que se emplea en la bibliografía para graficar los resultados, y que representa el

contenido de agua líquida en base seca (*kg de agua/kg de carne*):

$$M = \frac{c_w}{(1 - \phi)\rho_s} \quad (2.5)$$

donde  $\rho_s$  es la densidad del material del esqueleto sólido en [*kg m<sup>-3</sup>*].

Las ecuaciones de conservación de masa para cada componente, agua líquida, aire y vapor, para el problema en el que se considera el transporte de las dos fases en un medio poroso no saturado, se define mediante:

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{n}_{w,G} = -\dot{I} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial c_g}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{n}_{g,G} = \dot{I} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial c_g \omega_v}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{n}_{v,G} = \dot{I} \quad (2.8)$$

donde  $c_w$  y  $c_g$  son las concentraciones del agua líquida y de la fase gaseosa respectivamente en [*kg m<sup>-3</sup>*] y  $\omega_v$  es la fracción másica de vapor. Los términos primeros de la izquierda representan la acumulación temporal de unas y otras especies en cada punto. La divergencia del flujo másico  $\vec{n}_{i,G}$  del segundo término expresa la cantidad de materia que llega al punto o volumen de control en cada instante de tiempo. Y el término de la derecha es la tasa de sustancia que se genera o desaparece para convertirse en otra fase.

Sin embargo, la carne se ha tratado como un material saturado desde el inicio, es decir, no existe fase gaseosa en su interior, y el mecanismo dominante es el del transporte de agua líquida (no se considera el transporte de otras especies como grasa o carbohidratos ya que al trabajar con ternera, la proporción de éstos es muy baja). Además dentro del grupo en el que se clasifica a la carne durante el cocinado (figura 2.1), lo que sufre es un proceso de deshidratación de la matriz sólida, en el que el frente de evaporación se limita a la superficie del material, por lo que se ha considerado en primera instancia, que no existe tampoco generación interna de vapor (Dhall and Datta, 2011). Ésto supone que la fracción volumétrica de gas,  $\varepsilon_g$ , y la concentración de gas,  $c_g$ , en todo momento en el interior del producto sean nulas.



Con todo ello, para el caso aquí estudiado, las ecuaciones de conservación de masa en el interior del producto se reducen a la concerniente al agua líquida:

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{n}_{w,G} = 0 \quad (2.9)$$

Se ha de tener en cuenta que dado que el problema atañe a un medio deformable, el sólido tiene una velocidad de deformación  $\vec{v}_{s,G}$ , función del gradiente de deformación, que es a su vez función de la variable de estado de concentración de agua (ver figura 2.8). Por tanto, el flujo másico de agua respecto al observador estacionario se calcula con la siguiente suma:

$$\vec{n}_{w,G} = \vec{n}_{w,s} + c_w \vec{v}_{s,G} \quad (2.10)$$

donde el primer sumando es el flujo de agua respecto al sólido, y el segundo el flujo debido al movimiento del sólido.

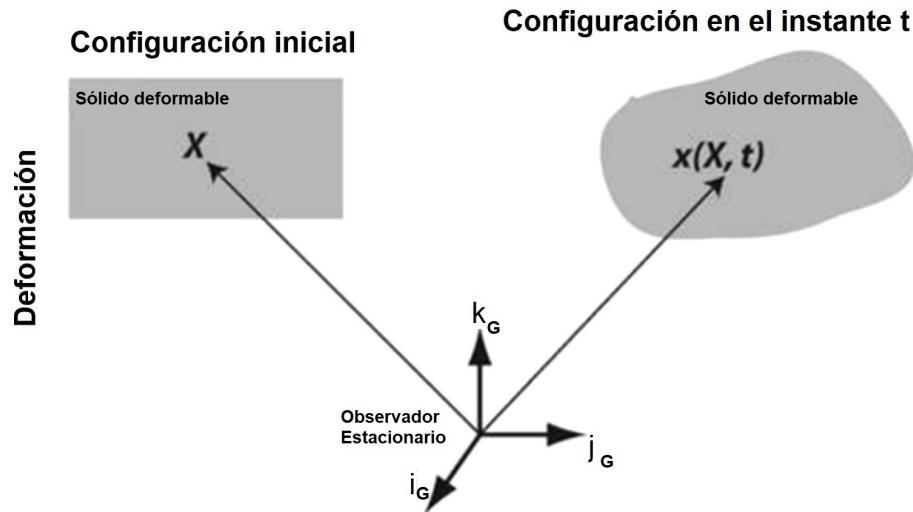


Figura 2.8: Configuración espacial deformada e indeformada del material durante el proceso de cocinado.

### 2.3.1.2. Desnaturalización de las proteínas

Durante el calentamiento las proteínas de la carne se desnaturalizan como se ha expuesto en el apartado 2.1, lo que causa el transporte de humedad y cambios estructurales. De esta manera, se puede establecer la relación de estos fenómenos con la variable de la capacidad de retención de agua, *Water Holding Capacity (WHC)*

o  $c_{w,eq}$ , que representa para una temperatura dada el contenido de agua que le correspondería en equilibrio termodinámico. En esta variable se recoge la forma en que evoluciona el contenido de agua conforme se produce la desnaturalización de las proteínas. Esta curva con forma de sigmoide, al igual que otras propiedades y como se ha justificado en el apartado 2.3, depende sensiblemente del tipo de carne analizada.

$C_{w,eq}$  se obtiene de manera experimental registrando el porcentaje en peso de humedad en equilibrio termodinámico a distintas temperaturas (Fuertes Bueno, 2018). Su evolución viene dada por la ecuación (2.11), ajustando las constantes  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_5$  propias de cada pieza de carne con los resultados experimentales.

$$C_{eq}(T) = a_1 - \frac{a_2}{1 + a_3 \exp(-a_4(T - a_5))} \quad (2.11)$$

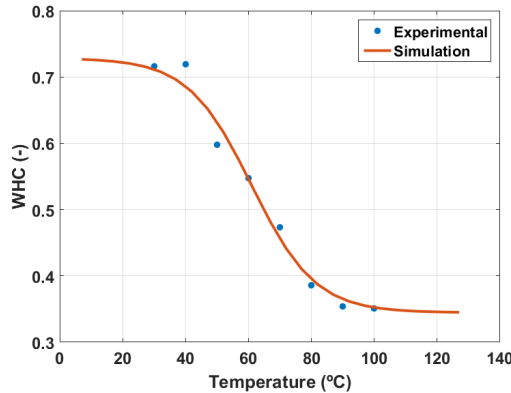


Figura 2.9: Curva de retención de agua ajustada para la ternera obtenida mediante experimentación.

### 2.3.1.3. Ecuaciones de transferencia de masa

Las ecuaciones que rigen la transferencia de masa han de modelar que con el incremento de la temperatura, se produce una caída de la capacidad de retención de agua debido a la desnaturalización de las proteínas. Es necesario mencionar, que en un proceso como el del cocinado en plancha, en el que la transferencia de calor es por contacto, los tiempos de cocinado son mucho menores que los del transporte de humedad. Ésto se traduce en que la concentración en una parte del filete sea mayor que la capacidad de retención de ésta en equilibrio.

Para cuantificar el transporte de humedad por difusión, se define la presión del agua líquida, *swelling pressure*. Ésta ha sido estimada empleando la teoría de Flory-Rehner, y en ella se tiene en cuenta la caída de la capacidad de retención de agua de la carne durante el calentamiento (Van der Sman, 2007). Tomando esta presión como nula para la fracción volumétrica de humedad en el equilibrio, y realizando una linealización de la expresión de Flory-Rehner en puntos próximos al equilibrio, se obtiene que la presión de agua líquida en la carne es proporcional a la diferencia entre la concentración de humedad en ese punto y la concentración de humedad en el equilibrio a esa temperatura,  $c_{w,eq}(T)$ :

$$p_w = C(c_w - c_{w,eq}(T)) \quad (2.12)$$

$C$  es una constante de proporcionalidad que, aunque tomada constante en este caso, puede ser dependiente de la temperatura:

$$C = \frac{D_w \mu_w}{\rho_w k_w} \quad (2.13)$$

donde  $D_w$  es la difusividad del agua en  $[m^2 s^{-1}]$ ,  $\mu_w$  es la viscosidad dinámica del agua en  $[Pa s]$ ,  $\rho_w$  la densidad del agua en  $[kg m^{-3}]$  y  $k_w$  la permeabilidad del agua en  $[m^2]$ .

Sin embargo, por la tipología del problema, no es posible establecer una expresión analítica de la presión  $p_w$ , que se pueda introducir en la ley de Darcy para el estudio del flujo del agua en un medio poroso, como sí sucede en otros problemas como en el estudio de la mecánica de suelos.

$$\vec{n}_{w,S} = -(\nabla p_w - \rho_w \vec{g}) \quad (2.14)$$

La ley de Darcy en la forma de la ecuación (2.14), expresa que los flujos de agua en un medio poroso son debidos al gradiente de presiones en el interior de la matriz sólida y la gravedad. Considerando despreciable éste último efecto por no resultar relevante como mecanismo de transporte en este problema, e introduciendo la expresión obtenida para  $p_w$  en (2.12), se obtiene el flujo de agua líquida en el interior de la matriz sólida. Agrupando se obtiene:

$$\vec{n}_{w,S} = -(D_w \nabla c_w - D_{w,T} \nabla T) \quad (2.15)$$

En la ecuación (2.15), se pueden distinguir dos términos de difusión: el primero de la

derecha tiene que ver con el gradiente de concentración de agua líquida en el material y el segundo término es debido al gradiente de temperatura. En consecuencia, se definen dos difusividades, cada una asociada a uno de los componentes: la primera de ellas,  $D_w$ , asociada al contenido de humedad de la carne; y la segunda  $D_{w,T}$ , con la variación de la concentración de agua en el material en el equilibrio. Ésta última se define mediante:

$$D_{w,T} = D_w \frac{\partial c_{w,eq}}{\partial T} \quad (2.16)$$

De esta manera, sustituyendo en la ecuación (2.9) para la conservación de masa del agua líquida, la ecuación (2.10) para el flujo de agua respecto al observador estacionario, donde el flujo de humedad se expresa mediante la ecuación (2.15), se obtiene:

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \cdot (c_w \vec{v}_{s,G}) = \nabla \cdot (D_w \nabla c_w + D_{w,T} \nabla T) \quad (2.17)$$

### 2.3.2. Transferencia de calor

Para el modelado de la transferencia de calor en el proceso de cocinado de carne en plancha se toman las siguientes consideraciones:

- No hay generación interna de calor y no se produce evaporación en el interior de la pieza de carne, por lo que el agua en el interior de la carne aparece solo en estado líquido.
- La distribución inicial de temperatura y de humedad es uniforme.
- Tanto la matriz sólida como el agua líquida en cada punto poseen la misma temperatura.
- La distribución de temperatura en la sartén es uniforme y constante en el tiempo de 215°C, gracias al sistema de control del equipo de inducción.

Así, el proceso de transferencia de calor en el interior del producto, asumiendo equilibrio térmico, se puede modelar con un único balance energético para todo el producto:

$$(\rho_{eff} C_{p,eff}) \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{n}_{w,G} \cdot \nabla (C_{p,w} T)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) \quad (2.18)$$

donde  $\rho_{eff}$  es la densidad del producto en  $[kg\ m^{-3}]$ ,  $C_{p,eff}$  el calor específico del producto en  $[Jkg^{-1}K^{-1}]$  y  $\lambda_{eff}$  la conductividad térmica del producto en  $[Wm^{-1}K^{-1}]$ . El cálculo de todas estas propiedades se describe en el apartado 2.6.

El primer término de la ecuación de transferencia de calor, es el término de acumulación que representa el incremento de temperatura. El segundo término representa la transferencia de calor por convección debida al transporte de agua líquida en el interior del sólido. Y el tercer término corresponde al efecto de la conducción térmica desde las zonas más calientes hacia las más frías, en la que aparece el laplaciano de la temperatura.

## 2.4. Formulación de la mecánica del sólido deformable

Para poder incorporar el efecto del cambio de volumen que se produce en el alimento como consecuencia del cocinado, es necesario considerar el producto como un material deformable.

### 2.4.1. Análisis de grandes deformaciones

Durante el cocinado en plancha, el trozo de carne puede llegar a encoger un 30% respecto su volumen inicial (Dhall and Datta, 2011). Esto requiere un planteamiento de grandes deformaciones para el análisis de la deformación del sólido.

La deformación viene dada por el tensor gradiente de deformación  $\mathbf{F}$ . En este caso se puede aplicar una descomposición multiplicativa para diferenciar los cambios de volumen asociados al cambio de humedad y los debidos al comportamiento deformable (Vujosevic and Lubarda, 2002).

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_M \mathbf{F}_{el} \quad (2.19)$$

donde  $\mathbf{F}_M$  y  $\mathbf{F}_{el}$  son los tensores de gradiente de deformación debido a la humedad y a efectos elásticos respectivamente.

Las tensiones debidas al cambio de volumen se relacionan con el jacobiano elástico  $J_{el}$  que se obtiene como la ratio del cambio de volumen total y el cambio de

volumen debido a la pérdida de humedad (figura 2.10).

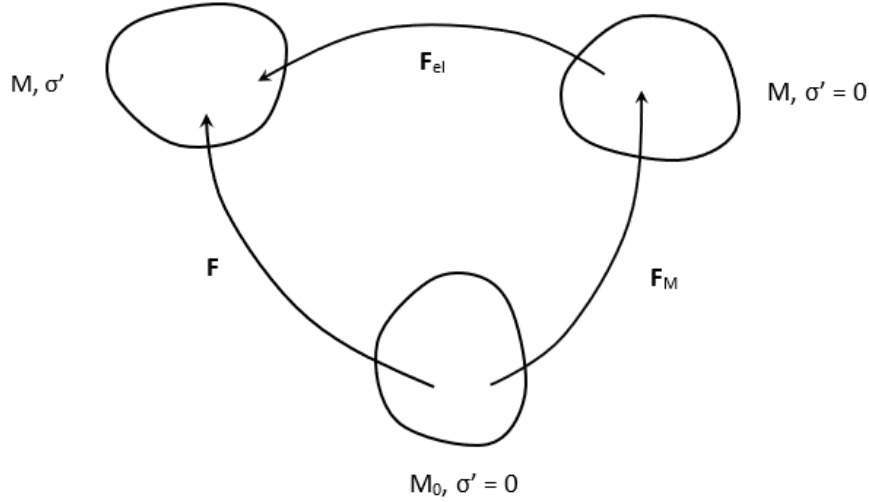


Figura 2.10: Descomposición multiplicativa del tensor gradiente de deformación, distinguiendo los efectos mecánicos y de la humedad.

### 2.4.2. Ecuaciones de equilibrio

Para grandes deformaciones es habitual emplear una formulación Lagrangiana para plantear las ecuaciones de equilibrio. En este tipo de coordenadas, la ecuación de equilibrio de momentos es:

$$\nabla x(\mathbf{S}'' \mathbf{F}_{el}^T) = 0 \quad (2.20)$$

donde  $\mathbf{S}''$  es el segundo tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff y  $\mathbf{F}_{el}$  es el tensor gradiente de deformación elástica. El término de la derecha es nulo ya que la evaporación del contenido de agua se limita a la superficie de la carne y por tanto, no hay un aumento de presión interna por la generación de una fase gaseosa. Por ello, el término del gradiente de la presión puede ser despreciado en este balance. Las tensiones del tensor  $\mathbf{S}''$ , se puede relacionar con las tensiones del tensor de Cauchy,  $\boldsymbol{\sigma}''$  de la siguiente manera:

$$\mathbf{S}'' = J \mathbf{F}_{el}^{-1} \boldsymbol{\sigma}'' \mathbf{F}_{el}^{-T} \quad (2.21)$$

La segunda ley de la termodinámica permite establecer la relación entre las tensiones de  $\mathbf{S}''$  y el tensor de Green-Lagrange para deformaciones elásticas,  $\mathbf{E}_{el}$ , a través de la función de energía de deformación,  $W_S$ :

$$\mathbf{S}'' = \frac{\partial W_S}{\partial \mathbf{E}_{el}} \quad (2.22)$$

### 2.4.3. Ley constitutiva

Es necesario establecer una ecuación constitutiva para la densidad de energía de deformación elástica,  $W_S$ , para caracterizar la deformación que sufre el material. Debido a la naturaleza gomosa con la que se trata a la carne como material, el esqueleto sólido se puede tratar como un material hiperelástico. Sin embargo, a pesar de que las fibras de la carne están orientadas de una manera concreta, y por ello, poseen distintas propiedades a lo largo y transversal a las mismas, en este primer trabajo se va a considerar que las propiedades mecánicas promedio del material son isótropas. El modelo constitutivo que se establece corresponde a un modelo Neo-Hookeano modificado:

$$W_{el} = \frac{K}{2}(J_{el} - 1)^2 + \frac{\mu}{2}(\bar{I}_1 - 3) \quad (2.23)$$

donde  $K$  es el modulo de compresibilidad del material en  $[Pa]$  y  $\mu$  su módulo de elasticidad transversal en  $[Pa]$ . El primer sumando de la derecha corresponde a la función de densidad de energía de deformación asociada al cambio de volumen y el segundo a la función de densidad de energía de deformación isocórica, o de cambio de forma. Como ya se ha definido,  $J_{el}$  es el jacobiano elástico, e  $\bar{I}_1$  es el primer invariante del tensor derecho de Cauchy Green modificado,  $\bar{\mathbf{C}} = (\overline{\mathbf{F}_{el}^T \mathbf{F}_{el}})$ , para la parte desviatoria del gradiente de deformación elástica,  $\overline{\mathbf{F}_{el}}$ .

La parte desviatoria del gradiente de deformación elástica se relaciona con el gradiente de deformación elástica,  $\mathbf{F}_{el}$ , y su parte volumétrica,  $J_{el}^{1/3}$  a través de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{F}_{el} = J_{el}^{1/3} \overline{\mathbf{F}_{el}} \quad (2.24)$$

Sin embargo, el Jacobiano elástico  $J_{el}$  viene marcado por el cambio de volumen debido a la pérdida de humedad, que se recoge en el llamado  $J_M$  (*Moisture Jacobian*), determinante del tensor  $\mathbf{F}_M$ :

$$\mathbf{F}_M = J_M^{1/3} \mathbf{I} \quad (2.25)$$

Para estimar el valor de  $J_{el}$ , y ante la ausencia de condiciones externas de tensión, la carne tan solo se contrae en función de la fracción de humedad perdida. Considerando  $V(t)$  el volumen total del producto en cada instante, y  $\varepsilon_w$  la fracción volumétrica del agua, se establece el siguiente balance:

$$V(t) - V_0 = \varepsilon_w(t)V - \varepsilon_{w,0}V_0 \quad (2.26)$$

$$J_M(t) = \frac{V}{V_0} = \frac{1 - \varepsilon_{w,0}}{1 - \varepsilon_w} \quad (2.27)$$

Como ya se ha expuesto en el apartado 2.3.1.1, la matriz sólida está saturada de agua en todo momento, así que la porosidad del esqueleto,  $\phi$ , coincide con la fracción volumétrica de agua,  $\varepsilon_w$ . Por ello y de manera análoga, se puede calcular el valor de la porosidad en cada instante de tiempo  $\phi(t)$ , considerando la incompresibilidad del esqueleto sólido, a partir de lo que éste representa en cada instante respecto al volumen total:

$$(1 - \phi(t))V = (1 - \phi_0)V_0 \quad (2.28)$$

$$\phi(t) = 1 - \frac{1 - \phi_0}{V(t)/V_0} = 1 - \frac{1 - \phi_0}{J(t)} \quad (2.29)$$

De este modo, el Jacobiano debido a la pérdida de humedad,  $J_M$ , es una función de estado (dependiente del contenido de humedad, variable del problema), y la porosidad,  $\phi(t)$ , es una variable del proceso (dependiente del Jacobiano total del sólido,  $J(t)$ ) representación de la variación volumétrica total.



## 2.5. Condiciones de contorno

Este modelo tiene en cuenta tres físicas diferentes, por lo que se va a realizar una distinción entre cada una de ellas a la hora de explicar las condiciones de contorno asociadas a cada problema. En la figura 2.11 se recoge un resumen de las condiciones de contorno.

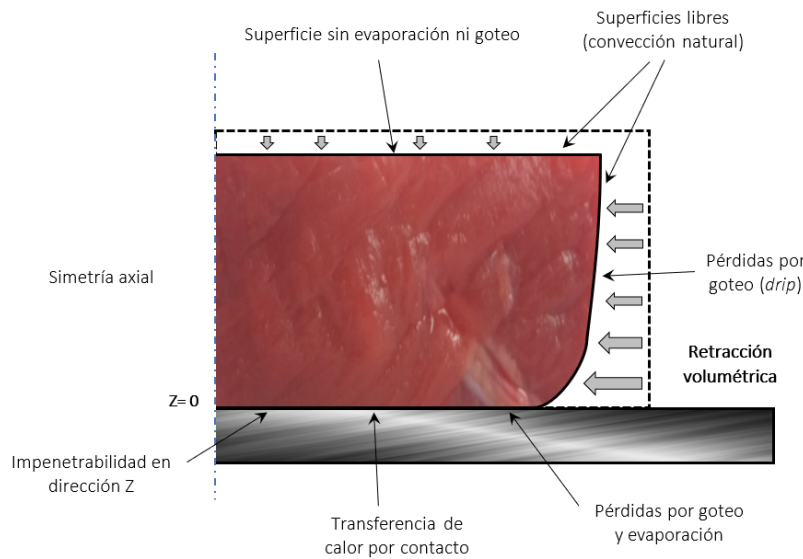


Figura 2.11: Esquema con las condiciones de contorno en el cocinado de carne en plancha. En línea discontinua se indica el contorno inicial y en continua el final.

### 2.5.1. Condiciones de contorno para la transferencia de humedad

En el instante inicial, el contenido en agua en la pieza de carne, como es lógico es el mismo que en el equilibrio, es decir, el que marca la curva WHC de equilibrio a la temperatura inicial. En lo que respecta a las condiciones de contorno, la pérdida de agua en la carne, tiene lugar sobre todo en la parte en contacto con la sartén, por ser la zona que adquiere una mayor temperatura. También se produce en las paredes laterales de la carne, aunque en menor medida y disminuyendo progresivamente conforme aumenta la distancia a la sartén. En la cara superior, ya que la temperatura es baja, se considera contorno cerrado para la pérdida de humedad. En cuanto a las formas en que se pierde este agua, se pueden diferenciar dos distintas, como se ha

mencionado en el apartado 2.3: por un lado aparece el flujo de agua líquida, goteo (*drip*), y por otro el flujo de vapor de agua.

### 2.5.1.1. Flujos por evaporación

Se considera que existe evaporación en la superficie de la carne en contacto con la sartén desde el primer instante, debido a las altas temperaturas. La magnitud del flujo de vapor en el proceso de evaporación viene dado de la siguiente manera:

$$n_{w,s,surfE} = h_m(\rho_{v,surf} - \rho_{v,amb}) \quad (2.30)$$

donde  $h_m$  es un coeficiente de transferencia de masa por convección, cuyas unidades son  $[m\ s^{-1}]$ . Los términos  $\rho_{v,surf}$  y  $\rho_{v,amb}$  son la densidad del vapor en la superficie y la densidad del vapor en el aire circundante respectivamente en  $[kg\ m^{-3}]$ . En ambos casos, las densidades se calculan considerando el vapor como gas ideal. De esta manera, se toma la temperatura del sólido en la superficie del contorno evaluado en el primer caso, y la temperatura ambiente en el segundo, ambos a presión ambiental:

$$\rho_{v,surf} = M_w \frac{P_{amb}}{RT} \quad (2.31)$$

$$\rho_{v,amb} = M_w \frac{P_{amb}}{RT_{amb}} \quad (2.32)$$

donde  $M_w$  es la masa molar del agua en  $[kg\ mol^{-1}]$ ,  $P_{amb}$  es la presión ambiente en  $[Pa]$  y  $R$  es la constante de los gases en  $[m^3\ Pa\ mol^{-1}\ K^{-1}]$ .

### 2.5.1.2. Flujos por goteo (*drip*)

El flujo por goteo sucede únicamente cuando la concentración de humedad en la superficie,  $c_{w,surf}$ , es mayor que la capacidad de retención de agua de la carne,  $c_{w,eq}$ . Este valor viene representado en la curva de retención de agua WHC. Así las pérdidas por goteo,  $n_{w,s,surfD}$ , bajo estas condiciones son igual al flujo que llega a la superficie menos el flujo por la evaporación superficial,  $n_{w,s,surfE}$ :

$$n_{w,s,surfD} = \vec{n}_{w,s} \cdot \vec{N}_{surf} - h_m(\rho_{v,surf} - \rho_{v,amb}) \quad (2.33)$$

El término  $\vec{n}_{w,s}$  ya se ha desarrollado en la ecuación (2.15), y representa el flujo de agua en el interior de la carne.

De este modo, el flujo total de humedad en la superficie, desde el punto de vista del observador estacionario (*ground*), es igual a la suma del flujo por goteo, la pérdida por evaporación, y el flujo debido al movimiento de la superficie de por si.

$$n_{w,G,surf} = n_{w,s,surfD} + n_{w,s,surfE} + c_w \vec{v}_{s,G} \cdot \vec{N}_{surf} \quad (2.34)$$

## 2.5.2. Condiciones de contorno para la transferencia de calor

La ecuación general para la transferencia de calor en los contornos es la siguiente:

$$q_{surf} = h(T_{amb} - T_{surf}) - \lambda n_{w,s,surf} - \vec{n}_{w,G} c_{p,w} T \cdot \vec{N}_{surf} \quad (2.35)$$

donde  $h$  es el coeficiente de convección térmica en  $[Wm^{-2}K^{-1}]$ ,  $T_{amb}$  es la temperatura del aire circundante a la carne en  $[K]$ ,  $T_{surf}$  la temperatura de la carne en la superficie en la que se está evaluando la condición de contorno,  $\lambda$  el calor latente de vaporización en  $[Jkg^{-1}]$  y  $c_{p,w}$  el calor específico del agua en  $[Jkg^{-1}K^{-1}]$ . El significado físico de cada uno de los términos es el siguiente: el primero corresponde a la convección natural externa, el segundo representa la energía consumida en el proceso de evaporación del agua, y el último el calor que transportan los flujos de agua salientes.

Sin embargo, se ha de considerar que no en todas las fronteras tienen lugar los mismos procesos. Como se ha visto en el subapartado 2.5.1, en la superficie inferior tiene lugar tanto el paso a fase vapor como el goteo de agua líquida; en las paredes laterales, se reduce al goteo; y en la cara superior no sucede ninguno de los dos fenómenos. Esto se refleja en los flujos de calor en esas superficies.

Se ha de considerar también la transferencia de calor por contacto con la sartén para la cara inferior de la carne. Como se ha explicado en la *física del cocinado*, el sistema inductor de la cocina asegura una temperatura constante en la sartén de 215°C. Ésto se traduce en un flujo de calor para las dos superficies de contacto definido por la ecuación (2.36) recogida en Fuertes Bueno (2018):

$$-\lambda_s \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z_{sarten}=0} = -\lambda_c \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z_{carne}=0} = H_c (T_s - T_{surf}) \quad (2.36)$$

donde  $T_s$ ,  $T_{surf}$  y  $\lambda_s$ ,  $\lambda_c$  son las temperaturas y conductividades térmicas de la sartén y de la cara inferior del trozo de carne en  $[K]$  y  $[Wm^{-1}K^{-1}]$ , respectivamente. El parámetro  $H_c$  representa la conductancia térmica del contacto entre ambas superficies en  $[Wm^{-2}K^{-1}]$ .

A continuación, y a modo de aclaratorio, se adjunta la tabla 2.1 en la que están particularizadas las condiciones de contorno para la transferencia de calor en cada una de las superficies.

Superficie	Eq.	I	II	III	Modelo cocinado carne en plancha
Superior	2.35	✓	0	0	$q_{superior} = I$
Lateral	2.35	✓	0	✓	$q_{lateral} = I - III$
Inferior	2.35, 2.36	contacto	✓	✓	$q_{inf} = h_c(T_{sarten} - T_{surf}) - II - III$

Tabla 2.1: Modelado de los flujos de calor en los contornos de la carne. La notación I, II y III hace referencia a cada uno de los términos de la ecuación 2.35.

### 2.5.3. Condiciones de contorno para la mecánica del sólido

En el aspecto mecánico de las condiciones de contorno existe un acoplamiento entre los dos cuerpos que componen el problema, sartén y carne. En un estado inicial y de manera ideal durante el resto del cocinado, debería existir un contacto permanente entre la superficie inferior de la carne y la base de la sartén. Esto se traduce en una condición de contacto mecánico en la dirección axial.

$$u_z|_{z_{carne}=0} = u_z|_{z_{sarten}=0} = 0 \quad (2.37)$$

Sin embargo, durante el análisis visual en los experimentos realizados para la validación de este modelo, se ha podido comprobar que en muchas ocasiones, este contacto no es perfecto y aparece un hueco o *gap* entre la sartén y la base de la carne. La razón del mismo es la contracción desigual de las fibras durante el cocinado, debido a la heterogénea composición de la carne. Esto afecta notablemente a la transferencia de calor por contacto. Por simplicidad, se ha hecho el modelado y simulación como un contacto perfecto durante todo el proceso de cocinado.

## 2.6. Parámetros

### 2.6.1. Cálculo de las propiedades térmicas del producto

Las propiedades térmicas del producto son función de la temperatura y de la concentración de agua. Por ello su valor, cambia en cada punto de la pieza y su cálculo vendrá dado en función de la temperatura en ese punto y la fracción másica o volumétrica de agua, según la propiedad. Ya que el tipo de carne empleada es la ternera, caracterizada por un contenido bajo en grasa, para el cálculo de las propiedades térmicas del producto se establecerá que tan solo está formado por proteínas y agua (Choi and Okos, 1986).

En primer lugar, se define la densidad del producto  $\rho_{eff}$ , aplicando la siguiente ecuación:

$$\rho_{eff}(T) = \varepsilon_w \rho_w(T) + \varepsilon_s \rho_s(T) \quad (2.38)$$

donde  $\rho_w$  y  $\rho_s$  son las densidades en  $[kg\ m^{-3}]$  del agua y de la parte sólida del producto, es decir, de la proteína.

La capacidad calorífica de la pieza del producto  $C_{p,eff}$  y la conductividad térmica  $\lambda_{eff}$  se calculan mediante las ecuaciones (2.39) y (2.40):

$$C_{p,eff}(T) = y_w C_{p,w}(T) + y_s C_{p,s}(T) \quad (2.39)$$

$$\lambda_{eff}(T) = y_w \lambda_w(T) + y_s \lambda_s(T) \quad (2.40)$$

donde se representan las respectivas propiedades para cada componente (subíndice  $w$  para el agua y  $s$  para la proteína). Las fracciones másicas se calculan en base a sus fracciones volumétricas definidas en las ecuaciones (2.3) y (2.4):

$$y_w = \frac{\varepsilon_w \rho_w}{\rho_{eff}} \quad y_s = \frac{\varepsilon_s \rho_s}{\rho_{eff}} \quad (2.41)$$

### 2.6.2. Parámetros de la carne obtenidos experimentalmente: capacidad de retención de agua y modulo elástico

A continuación se explican los parámetros obtenidos durante los ensayos experimentales en la Facultad de Veterinaria con el fin de caracterizar lo mejor posible el producto empleado.

La curva de retención de agua para la ternera ha sido obtenida por regresión no lineal en base a los datos proporcionados por el grupo de investigación de la Facultad de Veterinaria. El ajuste de los coeficientes de la ecuación (2.11) del apartado 2.3.1.2, da como resultado la ecuación (2.42) para la variable  $C_{eq}$ :

$$C_{eq}(T) = 0,7284 - \frac{0,3838}{1 + 0,6166 \exp(-0,09927(T - 338,9))} \quad (2.42)$$

El módulo elástico de la carne, se ha obtenido a partir de los valores experimentales de  $G$  a distintas temperaturas a través de la ecuación (2.43):

$$E(T) = \frac{G(T)}{2(1 + \nu)} \quad (2.43)$$

De acuerdo a la bibliografía (Feyissa et al., 2013), en el rango de los 50-80°C el módulo elástico de la carne se puede ajustar a una sigmoide. Por regresión lineal de los datos experimentales la expresión ajustada de  $E$  en  $[kPa]$  es:

$$E(T) = 36,4 + \frac{85,32}{1 + \exp(-0,3386(T - 68,04))} \quad (2.44)$$

La curva ajustada a los valores experimentales se muestra en la figura 2.12.

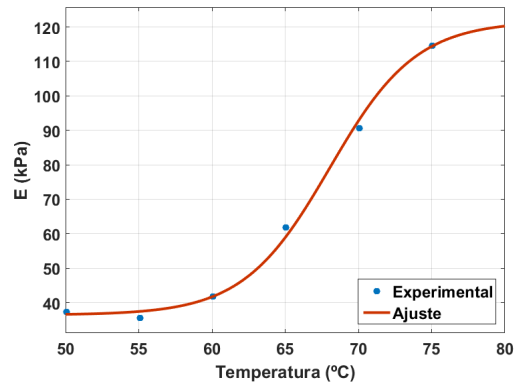


Figura 2.12: Ajuste del módulo elástico en función de la temperatura  $E(T)$  para la ternera.

### 2.6.3. Resumen de variables y parámetros

A continuación en las tablas 2.2 y 2.3 se recogen las variables y parámetros del problema que han intervenido en su desarrollo teórico.

Nombre	Descripción	Unidades
<b>VARIABLES DEL PROBLEMA</b>		
$T$	Temperatura en cada punto	$[K]$
$C_w$	Concentración de agua líquida	$[kg/m^3]$
$u$	Componente $x$ de la velocidad del sólido	$[m/s]$
$v$	Componente $y$ de la velocidad del sólido	$[m/s]$
$w$	Componente $z$ de la velocidad del sólido	$[m/s]$
<b>VARIABLES CALCULADAS</b>		
$V_T$	Volumen total de producto	$[m^3]$
$V_s$	Volumen de sólido	$[m^3]$
$V_w$	Volumen de agua	$[m^3]$
$\phi$	Porosidad del producto	
$M$	Fracción de agua líquida en base seca	
$\varepsilon_w$	Fracción volumétrica de agua	
$\varepsilon_s$	Fracción volumétrica de sólido	
$y_w$	Fracción másica de agua	
$y_s$	Fracción másica de sólido	
$\vec{n}_{w,G}$	Flujo másicos de agua (observador estacionario)	$[kg/(m^2s)]$
$\vec{n}_{w,S}$	Flujo másicos de agua (referido al sólido)	$[kg/(m^2s)]$
$\vec{v}_{s,G}$	Velocidad absoluta del sólido	$[m/s]$
$P_w$	Presión del agua ( <i>swelling pressure</i> )	$[Pa]$
$\mathbf{F}$	Tensor gradiente de deformación	
$\mathbf{F}_M$	Tensor gradiente de deformación debido a la humedad	
$\mathbf{F}_{el}$	Tensor gradiente de deformación por efectos elásticos	
$J$	Jacobiano total	
$J_{el}$	Jacobiano elástico	
$J_M$	Jacobiano por efecto de la humedad	
$\mathbf{S}''$	Segundo tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff	
$\boldsymbol{\sigma}''$	Tensor de tensiones de Cauchy	
$\bar{\mathbf{C}}$	Tensor derecho de Cauchy Green	
$\mathbf{E}_{el}$	Tensor de Green-Lagrange de deformaciones elásticas	
$W_S$	Función de energía de deformación	
$\bar{I}_1$	Primer invariante del tensor derecho de Cauchy Green	
$n_{w,s,surf}$	Flujo de agua en la superficie	$[kg/(m^2s)]$
$n_{w,s,surfE}$	Flujo de agua en la superficie por evaporación	$[kg/(m^2s)]$
$n_{w,s,surfD}$	Flujo de agua en la superficie por goteo	$[kg/(m^2s)]$
$\rho_{v,surf}$	Densidad del vapor en la superficie	$[kg/m^3]$
$q_{surf}$	Flujo de calor en la superficie	$[W/m^2]$

Tabla 2.2: Variables empleados en la definición del problema.



Nombre	Descripción	Unidades
<b>Parámetros del problema</b>		
$T_{amb}$	Temperatura del aire circundante	[K]
$T_{sarten}$	Temperatura de la sartén	[K]
$P_{amb}$	Presión del ambiente	[Pa]
$\lambda_s$	Conductividad térmica de la sartén	[W/(m K)]
$H_c$	Conductancia térmica del contacto sartén-carne	[W/(m <sup>2</sup> K)]
<b>Propiedades del producto</b>		
$C_{eq}$	Curva de contenido de agua en el equilibrio	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{eff}$	Densidad del producto	[kg/m <sup>3</sup> ]
$D_{w,T}$	Difusividad asociada al contenido de agua en el equilibrio	[kg/(m <sup>3</sup> s)]
$C_{p,eff}$	Calor específico del producto	[J/(kgK)]
$\lambda_{eff}$	Conductividad térmica del producto	[W/(mK)]
$K$	Módulo de compresibilidad del material	[Pa]
$E$	Módulo elástico del material	[Pa]
$\nu$	Ratio de Poisson	
$\mu$	Módulo de elasticidad transversal	[Pa]
$h_m$	Coefficiente de transferencia de masa por convección	[m/s]
$\lambda_c$	Conductividad térmica de la cara inferior de la carne	[W/(m K)]
<b>Propiedades del agua</b>		
$\rho_w$	Densidad del agua	[kg/m <sup>3</sup> ]
$k_w$	Permeabilidad del agua	[m <sup>2</sup> ]
$D_w$	Difusividad del agua	[m <sup>2</sup> /s]
$\mu_w$	Viscosidad dinámica del agua	[Pa/s]
$C_{p,w}$	Calor específico del agua	[J/(kgK)]
$\lambda_w$	Conductividad térmica del agua	[W/(mK)]
$\rho_{v,amb}$	Densidad del vapor a temperatura ambiente	[kg/m <sup>3</sup> ]
$M_w$	Masa molar del agua	[kg/mol]
$\lambda$	Calor latente de vaporización	[J/kg]
<b>Propiedades de la carne</b>		
$\rho_s$	Densidad de la carne	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_{p,s}$	Calor específico de la carne	[J/(kgK)]
$\lambda_s$	Conductividad térmica de la carne	[W/(mK)]

Tabla 2.3: Propiedades físicas del recipiente y del producto.



## SIMULACIÓN DEL MODELO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen los modelos de elementos finitos implementados en el software multifísico COMSOL Multiphysics ®5.2a. Para simular el proceso del cocinado de carne en plancha, se ha desarrollado un modelo 2D axisimétrico para una pieza de hamburguesa, una geometría 3D simplificada para el cocinado de trozos de ternera y una geometría 3D realista para el cocinado del filete completo de ternera. Para la validación del modelo, se emplearán los resultados de la bibliografía y los obtenidos durante la experimentación del grupo de investigación de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza.

### 3.1. Modelo de elementos finitos

En la construcción del modelo capaz de simular el proceso de cocinado en plancha se han considerado dos geometrías: la pieza de carne y la sartén. Cabe mencionar que la modelización de esta última, se ha realizado teniendo en cuenta la experiencia del grupo en la simulación de problemas similares. Por un lado, al garantizarse una temperatura constante en toda la superficie de la plancha, gracias al sistema de control de la inducción, se puede obviar el modelado del contacto entre el cristal vitrocerámico y la plancha con su respectiva distribución de potencias, simulado en Fuertes Bueno (2018). Por otro lado, se ha comprobado la escasa influencia sobre el cocinado que ejercen las paredes de la sartén; siendo el único efecto considerable, el aumento de la temperatura del aire que rodea a la pieza de carne. De esta manera al reducir el número de elementos de malla, se reducen los tiempos de cálculo.

Para el modelado de los distintos fenómenos que tienen lugar durante el cocinado considerando también el fenómeno de la retracción, se han empleado los módulos físicos del software de “transferencia de calor en sólidos”, “transporte de especies diluidas” y de “mecánica de sólidos”, ajustando las ecuaciones y los parámetros a las del problema físico tratado (figura 3.1). Las variables del problema a resolver son respectivamente para cada módulo: la temperatura  $T$  [K], la concentración molar de agua en el sólido  $c_w$  [ $mol\ m^{-3}$ ] y las velocidades  $u, v, w$  [ $m\ s^{-1}$ ]. De esta manera, se pueden registrar la temperatura en cada punto, la pérdida de peso, la distribución de humedad, la deformación y la pérdida de volumen en el trozo de carne estudiado.

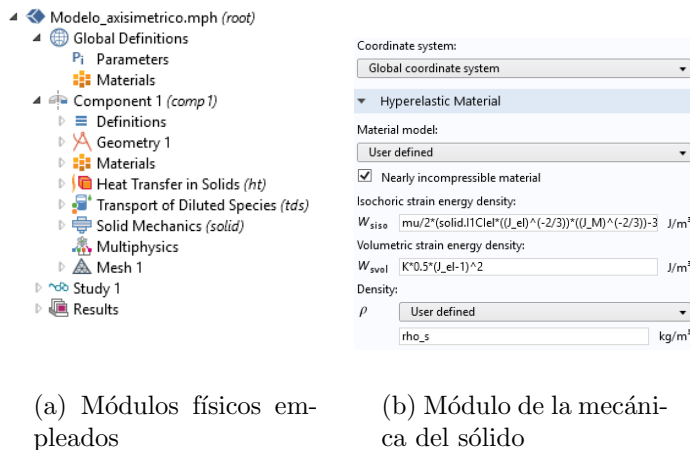


Figura 3.1: Detalles del modelado del problema en COMSOL.

En el modelo 2D axisimétrico, las coordenadas empleadas son cilíndricas y sus ejes son  $r, \theta$  y  $z$ . Al existir simetría de revolución, los desplazamientos en  $\theta$  son nulos y por tanto, las variables referentes a la mecánica de sólidos se limitarán a los desplazamientos en  $r$  y  $z$ , es decir,  $u$  y  $w$  [ $m\ s^{-1}$ ].

Además, a la hora de definir en el módulo de mecánica de sólidos la ley constitutiva para la función de energía (apartado 2.4.3), el programa calcula internamente los valores del jacobiano elástico,  $J_{el}$ , y del primer invariante del tensor derecho de Cauchy Green,  $\bar{I}_1$ . Sin embargo, éste de por sí, no tiene en cuenta la humedad como la causa de la deformación, y por tanto, no la considera en el cálculo de estas dos variables. Por ello, ha sido necesario definir dos variables independientes a las del propio programa para que hagan su función considerando el cambio de volumen debido a la pérdida de humedad (figura 3.1 b):

$$J_{el} = \frac{J_M}{J} \quad (3.1)$$

$$\bar{I}_1 = J_{el}^{-2/3} J_M^{-2/3} tr(\mathbf{F}^T \mathbf{F}) \quad (3.2)$$

donde  $J$  es el jacobiano total calculado por el programa y  $tr(\mathbf{F}^T \mathbf{F})$  es el primer invariante del tensor derecho de Cauchy Green calculado internamente por COMSOL. En el caso del jacobiano elástico, representa lo que ya se había definido en el apartado 2.4.1, la ratio entre la variación de volumen debida a la pérdida de humedad y la variación total. La expresión (3.2) para el primer invariante es el resultado de la manipulación matemática a partir del cálculo de la traza del tensor derecho de Cauchy Green,  $\bar{\mathbf{C}}$ .

## 3.2. Modelo 2D axisimétrico

Ante la novedad que supuso desarrollar un modelo que considerase la retracción durante el cocinado, y como parte del proceso de aprendizaje, se comenzó desarrollando un modelo axisimétrico para facilitar la convergencia y chequear la funcionalidad del mismo.

### 3.2.1. Simulación del modelo

La geometría circular puede ser reproducida por un modelo 2D axisimétrico, y por ello se ha empleado para simular el cocinado en plancha de una pieza de hamburguesa. Para poder comparar los resultados obtenidos, se han tomado las mismas condiciones y dimensiones que en el artículo de Dhall and Datta (2011), cuyos resultados numéricos y experimentales se emplearon posteriormente para su validación. En la tabla 3.1 se recogen los valores de todos los parámetros empleados para definir el problema y en la figura 3.2 se pueden ver la geometría axisimétrica y su resultado revolucionado.

Nombre	Valor	Unidades	Fuente
<b>Condiciones iniciales</b>			Dhall and Datta (2011)
$T_{inicial}$	5	[°C]	
$Diámetro$	10	[cm]	
$Espesor$	1.8	[cm]	
$C_{w,0}$	0.7274	[kg <sub>agua</sub> /kg <sub>producto</sub> ]	
<b>Parámetros del problema</b>			Dhall and Datta (2011)
$T_{amb}$	60	[°C]	
$T_{sartén}$	120	[°C]	
$\lambda_s$	238	[W/(m K)]	Material de COMSOL (aluminio)
$H_c$	50	[W/(m <sup>2</sup> K)]	Experimental
<b>Propiedades del producto</b>			Dhall and Datta (2011)
$C_{eq}$	Ecuación 2.42	[kg/m <sup>3</sup> ]	Ensayo experimental
$K$	$\frac{K_w}{\varepsilon_w}$	[Pa]	
$K_w$	$2.2 \cdot 10^9$	[Pa]	
$h_m$	0.01	[m/s]	
$\rho_w$	997.2	[kg/m <sup>3</sup> ]	
$D_w$	$10^{-7}$	[m <sup>2</sup> /s]	
$C_{p,w}$	4178	[J/(kgK)]	
$\lambda_w$	0.57	[W/(mK)]	
$M_w$	18.01528	[kg/kmol]	
$\lambda$	$2.26 \cdot 10^6$	[J/kg]	
$\rho_s$	1330	[kg/m <sup>3</sup> ]	
$C_{p,s}$	2090	[J/(kgK)]	
$\lambda_s$	0.18	[W/(mK)]	
$E$	90	[kPa]	
$\nu$	0.49		

Tabla 3.1: Propiedades físicas del problema 2D axisimétrico.

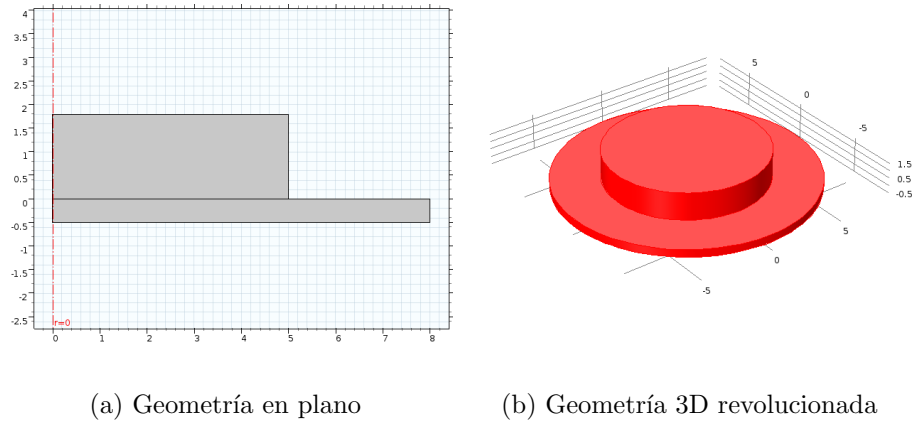


Figura 3.2: Geometría axisimétrica simulada en COMSOL Multiphysics.

El tipo de elemento de malla seleccionado para este modelo ha sido un elemento cuadrilátero con aproximación cuadrática para las tres variables del problema (temperatura, concentración de agua y desplazamientos). Para seleccionar el tamaño de elemento adecuado, se ha realizado un análisis de sensibilidad para una malla gruesa y una fina (figura 3.3).

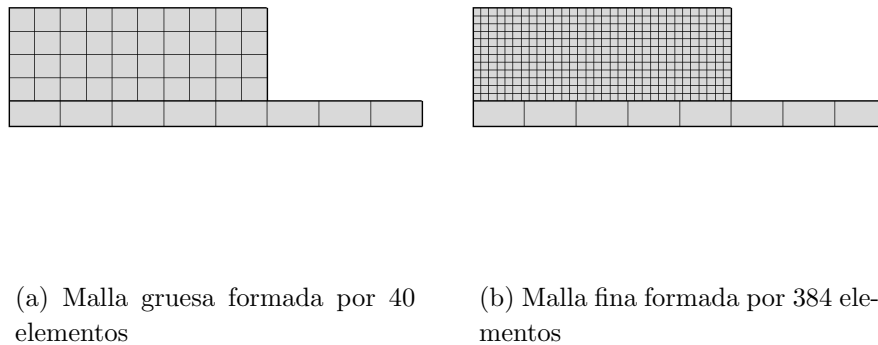
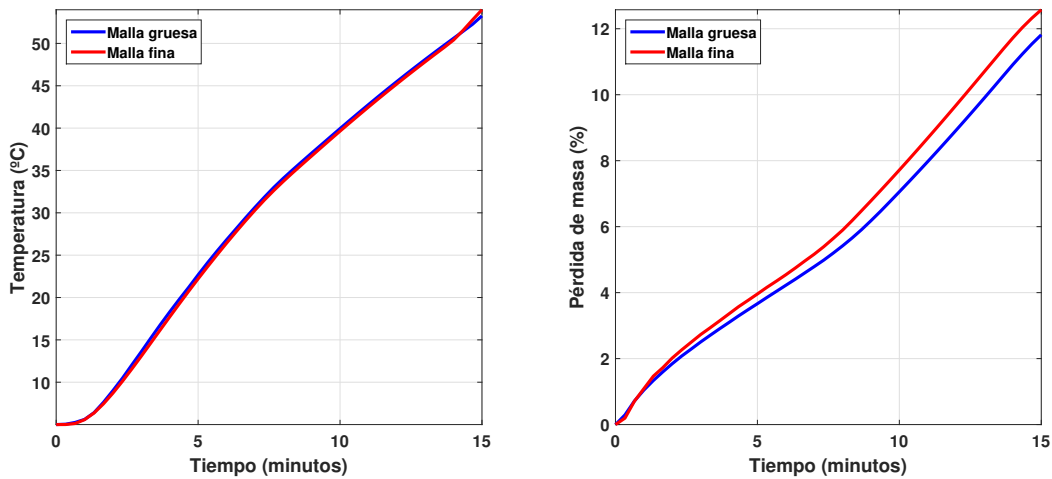


Figura 3.3: Mallas empleadas en el análisis de sensibilidad.

Como se puede observar en la figura 3.4, su influencia en los resultados es escasa, siendo tan solo notable la diferencia en los tiempos de computación (27 minutos la malla gruesa y 1 hora y 25 minutos la fina). Sin embargo, en lo que respecta a la retracción, un mayor afinamiento de la malla se traduce en unas deformaciones más

precisas, lo que requiere buscar un compromiso entre tiempo de cálculo y precisión en la deformación.



(a) Evolución de la temperatura en el punto central

(b) Evolución de la pérdida de masa

Figura 3.4: Resultados en cada tamaño de malla para la geometría 2D axisimétrica.

Finalmente, la malla empleada ha sido una compuesta por 127 elementos de los cuales 119 están en la pieza hamburguesa (figura 3.5).

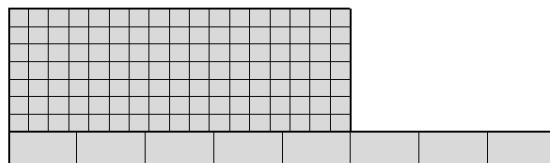


Figura 3.5: Malla empleada en la simulación del modelo 2D axisimétrico.



### 3.2.2. Validación del modelo

En primer lugar se va a analizar cómo evoluciona el contenido de agua en la pieza. En la figura 3.6 se realiza una comparativa entre el modelo simulado y la bibliografía para el contenido de humedad en base seca,  $M$ , en distintos instantes de tiempo (3, 6, 9, 12 y 15 minutos) sobre la mitad de un corte longitudinal. Como se puede observar, los resultados obtenidos son semejantes a los de la bibliografía. Los valores máximos de humedad son ligeramente superiores a los iniciales ( $M_{inicial} = 2.6$ ) debido a la difusión que experimenta el agua hacia las zonas más frías, en este caso la superficie superior. El contenido mínimo de humedad se puede encontrar en la zona en contacto con la sartén, donde tras 15 minutos de cocinado, ha caído hasta aproximadamente una tercera parte del contenido inicial.

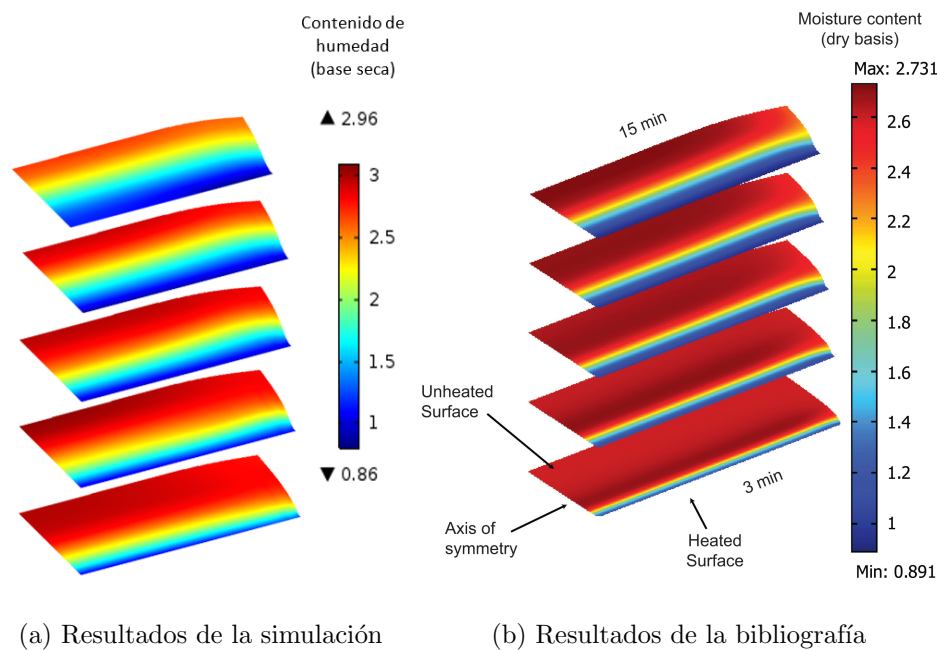


Figura 3.6: Comparativa entre los resultados de la simulación y los de la bibliografía (Dhall and Datta, 2011) para el contenido de humedad en base seca en distintos instantes de tiempo.

De manera análoga para la temperatura, se muestra en la figura 3.7 la comparativa en los cortes para los mismos instantes de tiempo. Se puede observar que la parte inferior alcanza ya una temperatura próxima a los  $80^{\circ}\text{C}$  en los primeros 3 minutos por la influencia de la plancha, y desde ese instante sufre un calentamiento menos pronunciado. Destacar que en la bibliografía no se especifica el valor de conductancia

térmica para el contacto hamburguesa-sartén ( $H_c$ ) que se ha empleado. Por ello, para el modelo de este trabajo se ha usado una conductancia de valor  $H_c=50 [W/(m^2K)]$  ajustada experimentalmente ante la imposibilidad de medir este parámetro.

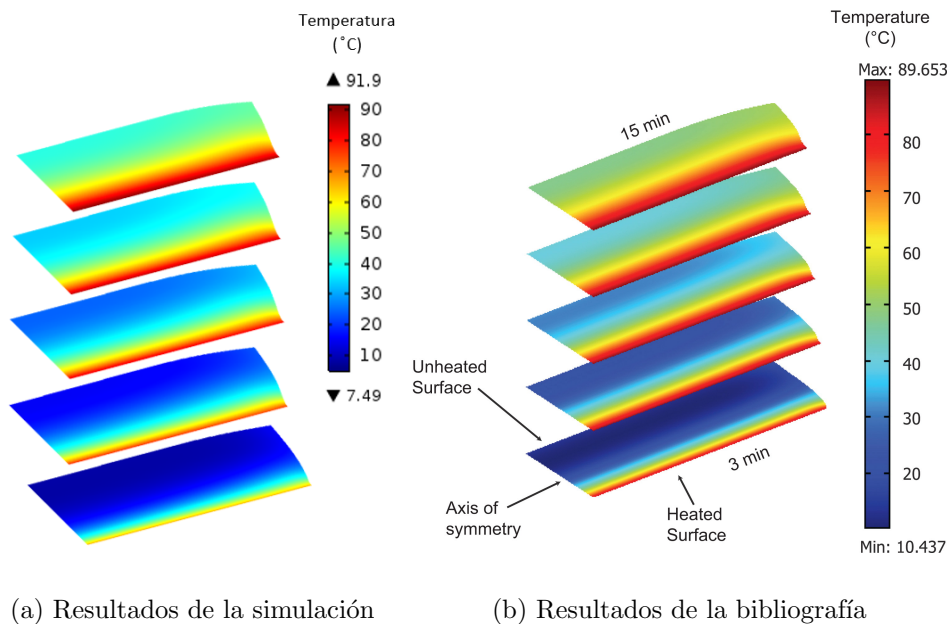
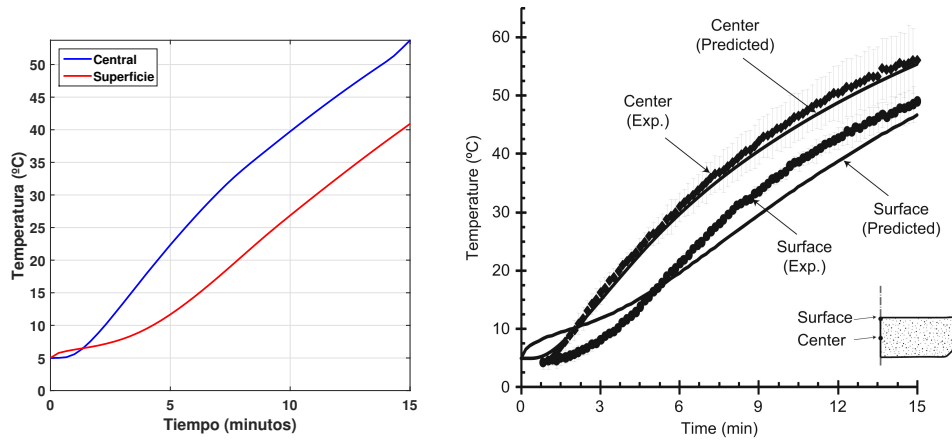


Figura 3.7: Comparativa entre los resultados de la simulación y los de la bibliografía (Dhall and Datta, 2011) para la distribución de temperaturas en distintos instantes de tiempo.

Para el punto central y el punto en la superficie, los datos se recogen en la figura 3.8. Si se analizan los primeros instantes de cocinado simulados, se observa que la temperatura en la superficie es mayor que en el centro, lo que indica que al comienzo tiene una mayor influencia el calentamiento por convección del entorno caliente, que la transmisión del calor de la sartén por el interior de la pieza. Este fenómeno se revierte pasados unos 90 segundos. El no ajuste a los datos experimentales en estos primeros instantes, se puede explicar con que la temperatura del aire que rodea la carne no sea uniforme, y que los  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  medidos no se correspondan a la temperatura en la parte superior y que en esta zona pueda ser algo menor. La influencia de la temperatura ambiente se estudiará en el apartado 3.5.



(a) Resultados de la simulación

(b) Resultados de la bibliografía

Figura 3.8: Comparativa entre los resultados de la simulación y los de la bibliografía (Dhall and Datta, 2011) de la temperaturas en el punto central y en la superficie a lo largo del tiempo.

En lo que respecta a la validación del fenómeno de la retracción y de manera cuantitativa, la variación volumétrica en la bibliografía se ha calculado en base a la variación de diámetro normalizado, tomando medidas del diámetro en tres alturas, en contacto con la sartén, en el centro y en la parte superior (ecuación (3.3) y figura 3.9).

$$D_{norm}(t) = \frac{D_1(t) + D_2(t) + D_3(t)}{D_0} \tag{3.3}$$

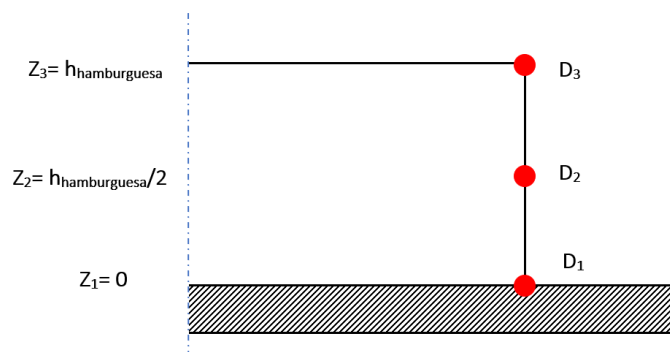
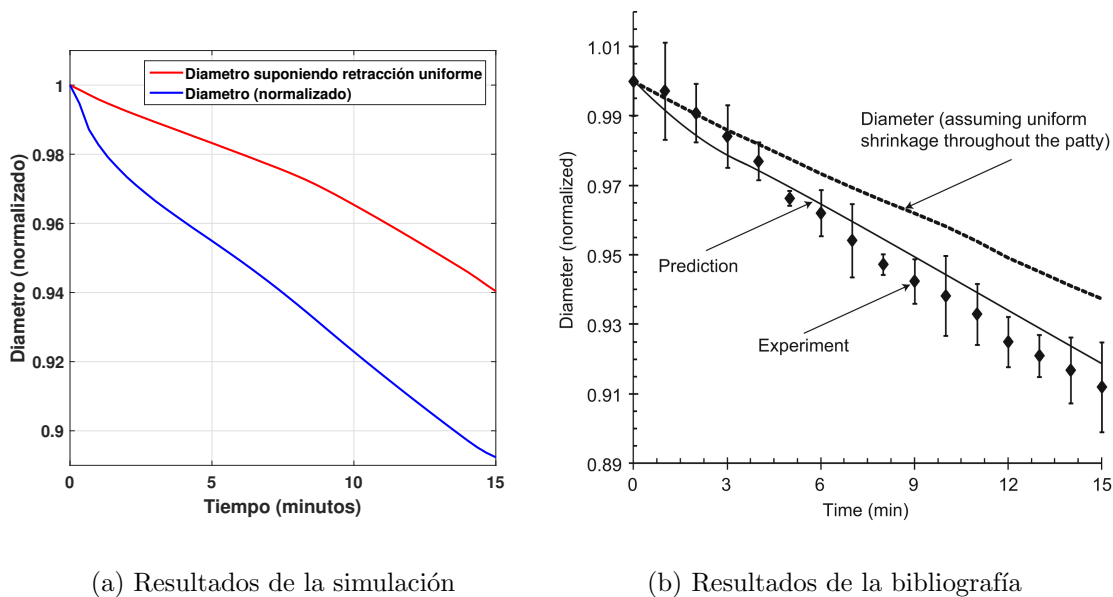


Figura 3.9: Esquema de los puntos tomados para calcular el diámetro normalizado.

En la figura 3.10 se realiza una comparativa entre los valores de los diámetros normalizados para el modelo simulado y el de la bibliografía. Los resultados muestran una variación del diámetro cercana al 10 %.



(a) Resultados de la simulación

(b) Resultados de la bibliografía

Figura 3.10: En azul, diámetro normalizado promedio basado en la ecuación 3.3. En rojo el diámetro normalizado calculado considerando retracción uniforme en todas las direcciones. En la bibliografía (Dhall and Datta, 2011) se concluye que esta hipótesis no se ajusta a los datos experimentales de variación del diámetro.

Por otra parte y de una manera más visual, en la figura 3.11 se muestra la evolución de la deformación que sufre la geometría revolucionada en distintos instantes de tiempo. Las zonas donde más apreciable resulta este fenómeno es en la esquina inferior en contacto con la sartén, zona en la que existe el efecto doble de contacto con la sartén y la exposición al ambiente.

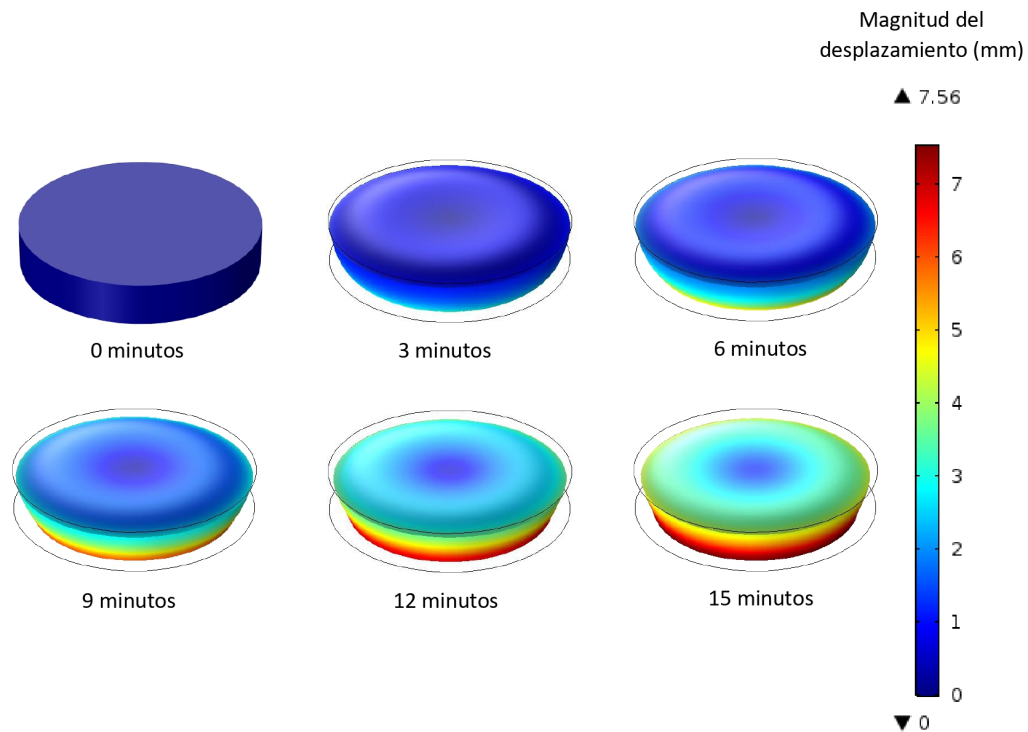


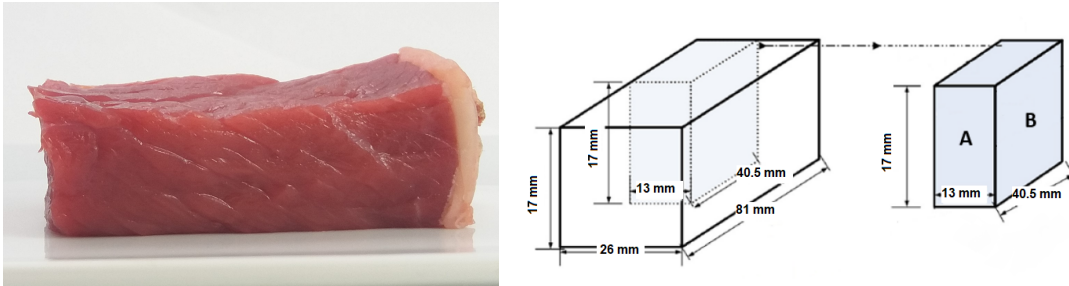
Figura 3.11: Evolución temporal de la magnitud del desplazamiento en la simulación del cocinado de la pieza de hamburguesa. Los contornos negros son la forma original antes del cocinado.

### 3.3. Modelo 3D con geometría simplificada

Tras obtener unos resultados muy semejantes a los de la bibliografía en el modelo axisimétrico, el siguiente paso fue validar el modelo empleado con resultados experimentales propios. Para ello, se ha aplicado a un modelo en 3D.

#### 3.3.1. Simulación del modelo

En primer lugar se desarrolló una geometría simplificada, pero lo más precisa posible a los trozos de ternera utilizados durante la fase experimental en la Facultad de Veterinaria. Dada la forma prismática de estos trozos (figura 3.12), y por tanto su simetría, se ha modelado tan solo un cuarto de la misma, y se imponen las correspondientes condiciones de contorno de simetría, sobre las caras A y B.

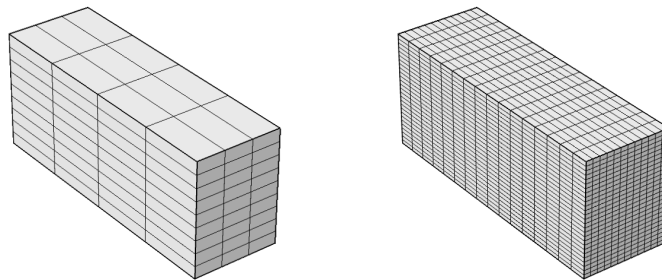


(a) Trozo de ternera antes del cocinado

(b) Dimensiones del modelo

Figura 3.12: Geometría real y simulada del trozo de ternera.

El tipo de elemento de malla empleado ha sido el hexaédrico también con aproximación cuadrática de las variables para la carne. En la sartén se ha usado un elemento tetraédrico. De manera análoga a como se ha procedido en el modelo 2D, se ha analizado la influencia del tamaño de malla en los resultados (figura 3.13).

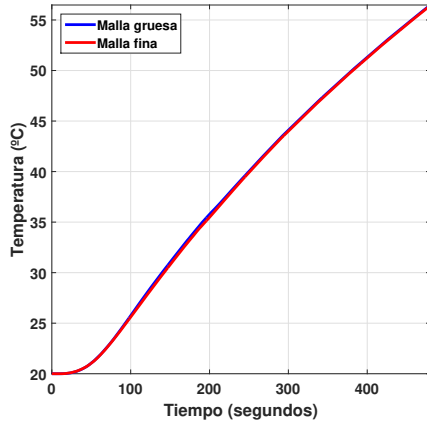


(a) Malla gruesa formada por 108 elementos

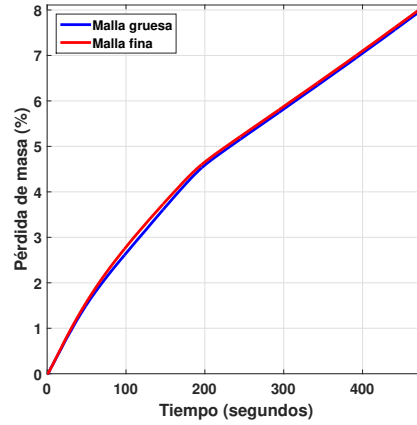
(b) Malla fina formada por 5184 elementos

Figura 3.13: Mallas empleadas en el análisis de sensibilidad de la geometría 3D.

La conclusión obtenida ha sido la misma que en el caso anterior, teniendo una escasa influencia sobre los resultados (figura 3.14) y una gran diferencia en los tiempos de cálculo (3 minutos la malla gruesa frente a 29 minutos la malla fina).



(a) Evolución de la temperatura



(b) Evolución de la pérdida de masa

Figura 3.14: Comparativa de los resultados en cada tamaño de malla para la geometría 3D.

La malla empleada en la validación de resultados ha sido la de la figura 3.15, compuesta por 3217 elementos de los cuales 864 están en el trozo de carne. El tiempo de cálculo ha sido de 6 minutos para 8 minutos de simulación.

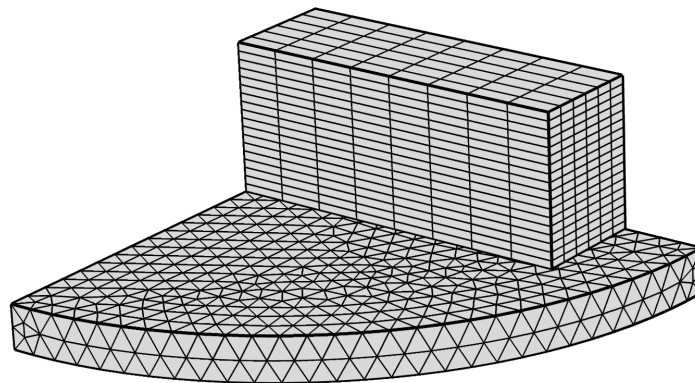


Figura 3.15: Malla empleada en la simulación del modelo 3D.

En la tabla 3.2 se incluyen las propiedades físicas que definen el problema 3D del cocinado de ternera.

Nombre	Valor	Unidades	Fuente
<b>Condiciones iniciales</b>			Ensayos experimentales
$T_{inicial}$	20	[°C]	
$Ancho$	2.6	[cm]	
$Espesor$	1.7	[cm]	
$Largo$	8.1	[cm]	
$C_{w,0}$	0.7222	[kg <sub>agua</sub> /kg <sub>producto</sub> ]	
<b>Parámetros del problema</b>			Ensayos experimentales
$T_{amb}$	20	[°C]	
$T_{amb,lateral}$	60	[°C]	
$T_{sartén}$	215	[°C]	
$\lambda_s$	44.5	[W/(m K)]	Material de COMSOL (acero)
$H_c$	50	[W/(m <sup>2</sup> K)]	Experimental
<b>Propiedades del producto</b>			
$C_{eq}$	Ecuación 2.42	[kg/m <sup>3</sup> ]	Ensayo experimental
$h_m$	0.012	[m/s]	Experimental
$\rho_w$	997.2	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dhall and Datta (2011)
$D_w$	$3.5 \cdot 10^{-8}$	[m <sup>2</sup> /s]	Experimental
$C_{p,w}(T)$	$4.1289 - 9.0864 \cdot 10^{-5}T + 5.4731 \cdot 10^{-6}T^2$	[J/(kgK)]	Choi and Okos (1986)
$\lambda_w(T)$	$5.7109 \cdot 10^{-1} + 1.7625 \cdot 10^{-3}T - 6.7036 \cdot 10^{-6}T^2$	[W/(mK)]	Choi and Okos (1986)
$M_w$	18.01528	[kg/kmol]	Dhall and Datta (2011)
$\lambda$	$2.26 \cdot 10^6$	[J/kg]	Dhall and Datta (2011)
$\rho_s(T)$	$1.3299 \cdot 10^3T - 5.1840 \cdot 10^{-1}T$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Choi and Okos (1986)
$C_{p,s}(T)$	$2.0082 + 1.2089 \cdot 10^{-3}T - 1.3129 \cdot 10^{-6}T^2$	[J/(kgK)]	Choi and Okos (1986)
$\lambda_s(T)$	$1.7881 \cdot 10^{-1} + 1.1958 \cdot 10^{-3}T - 2.7178 \cdot 10^{-6}T^2$	[W/(mK)]	Choi and Okos (1986)
$E$	Ecuación 2.44	[kPa]	Ensayo experimental
$\nu$	0.49		Dhall and Datta (2011)

Tabla 3.2: Propiedades físicas del problema 3D.



### 3.3.2. Validación del modelo

Los ensayos con los que se ha validado este modelo, estaban dirigidos a la caracterización del proceso de cocinado por parte del grupo de Alimentos de Origen Vegetal de la Facultad de Veterinaria. Con ellos se pretendía obtener un conocimiento más amplio de cómo pueden influir parámetros como el tiempo de cocinado, espesor y forma de la pieza o el tipo de carne en las variables del cocinado de pérdida de peso, perfiles de temperaturas y evolución del color.

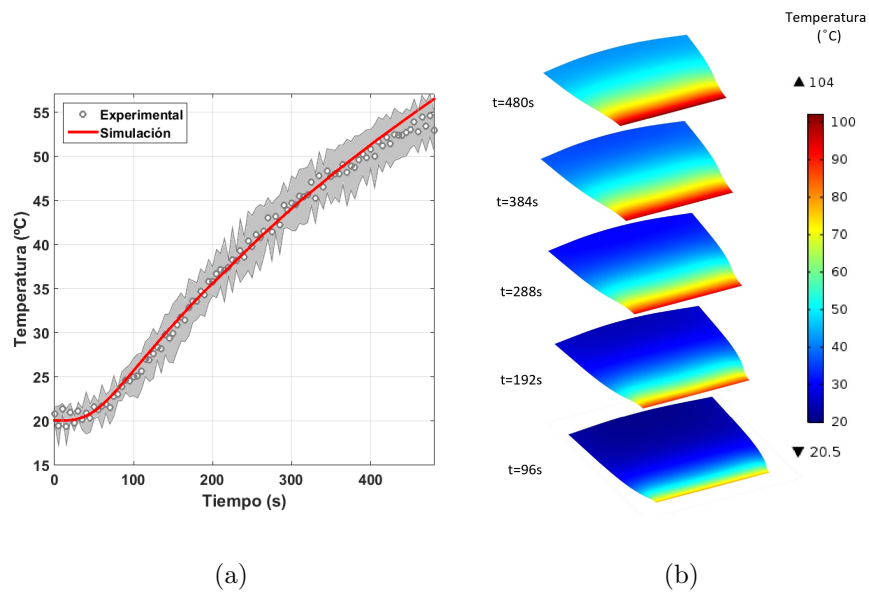


Figura 3.16: Evolución temporal de la temperatura en el punto central y de la distribución de temperaturas en un corte transversal.

En el estudio de la temperatura en la carne, en la gráfica a) de la figura 3.16 se ha representado la evolución temporal de la temperatura en el punto central obtenida con el modelo, comparada con los resultados obtenidos experimentalmente durante el cocinado por una cara durante 8 minutos. Se observa que evoluciona de manera lineal tras pasar unos pocos segundos de cocinado. La figura 3.16 b) muestra la distribución de temperaturas en un corte transversal para tiempos equitativos. Al igual que sucede en la hamburguesa, la temperatura de la cara en contacto con la sartén es elevada al poco tiempo de empezar y se estabiliza al cabo de unos pocos minutos.

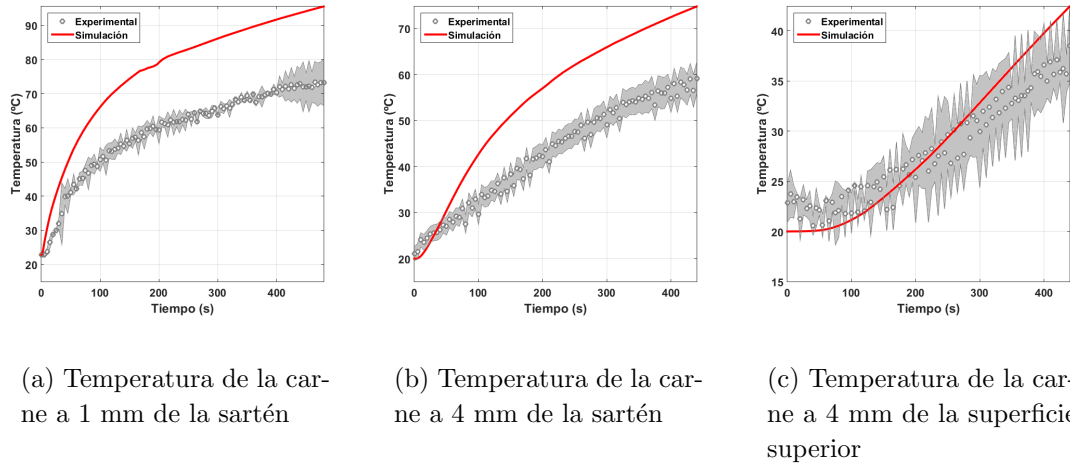
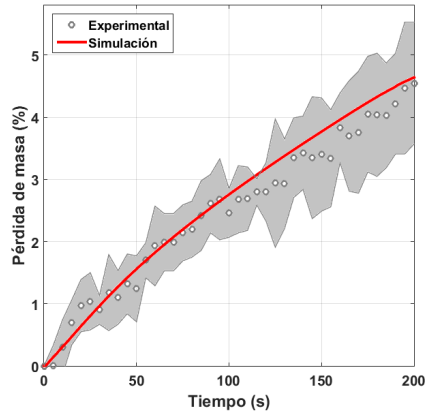


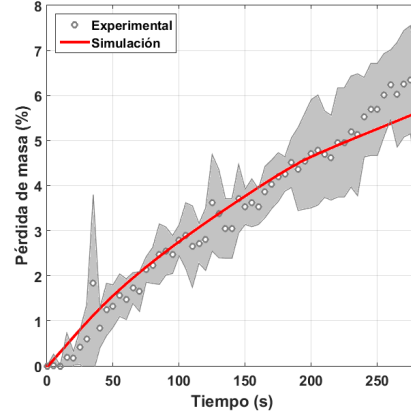
Figura 3.17: Perfiles de temperatura para distintos puntos.

Para el estudio de este fenómeno se realizaron medidas en varios puntos además de en el central (figura 3.17). Se observó que los resultados experimentales son sensiblemente más bajos en las zonas próximas a la plancha que los calculados por el modelo (figura 3.17 a) y b). Cabe mencionar la dificultad para tomar estas medidas debido a los grandes gradientes de temperaturas en esta zona. Sin embargo, el modelo no refleja de manera adecuada la forma en que se produce el contacto ni los posibles fenómenos que pueden causar el incremento excesivo de temperatura en las zonas de la parte inferior, mientras que sí se ajusta para la temperatura central como se ha visto en la figura 3.16 y para la de la parte superior, en la figura 3.17 c). En el apartado 3.5 se realizará un análisis de sensibilidad del parámetro  $H_c$  de conductancia en el contacto carne-plancha.

La pérdida de masa para el trozo de carne de espesor 17 mm se recoge en la figura 3.18 y la distribución del contenido de humedad para tiempos equitativos en la figura 3.19. Se han comparado los resultados con los ensayos realizados para los puntos de cocinado *medium rare* y *done*, en los que la primera vuelta se da a los 200 y 280 segundos respectivamente. Los resultados calculados se ciñen a los medidos durante la experimentación, donde la mayor tasa de pérdida es al principio y se va suavizando conforme avanza el tiempo.

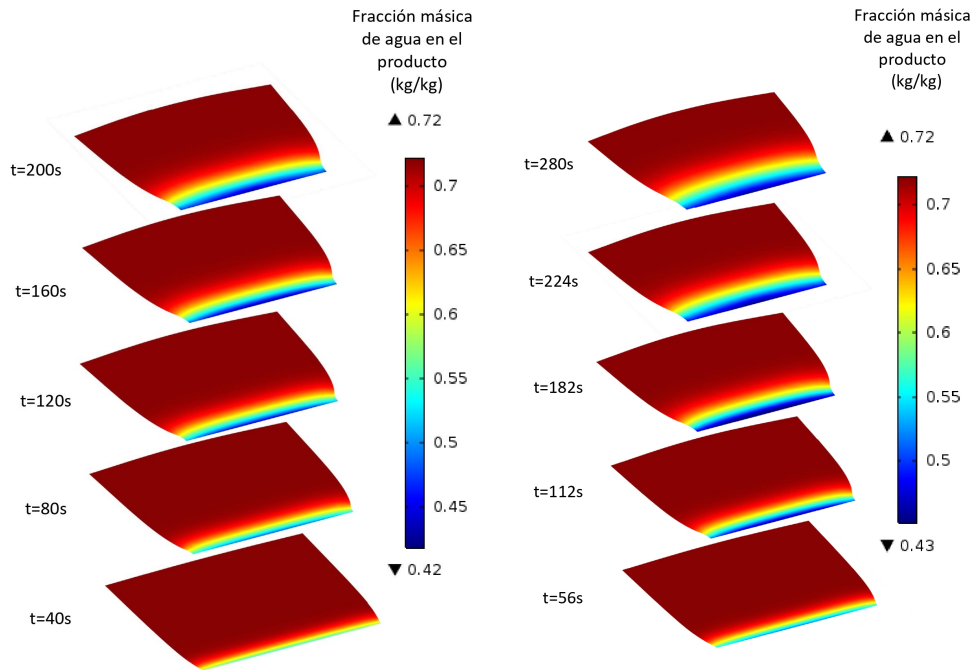


(a) 200 segundos



(b) 280 segundos

Figura 3.18: Evolución de la pérdida de masa en el trozo de ternera.



(a) 200 segundos

(b) 280 segundos

Figura 3.19: Evolución de la distribución de humedad para distintos tiempos.

En cuanto a la retracción, la validación se ha realizado en base a la tipología de ensayo que se ha creado para este TFG. Está basada en la computación por visión de las imágenes grabadas durante el cocinado desde distintas perspectivas. Los aspectos más relevantes del proceso de grabado y del posterior análisis por ordenador se desarrollan en el apéndice A. En la figura 3.20 se comparan los resultados experimentales y simulados para la variación volumétrica respecto al volumen inicial. Al tratarse de un método de procesamiento de la imagen basado en el análisis del color en cada frame, aparece ruido en la medida. Esto explica resultados puntuales erróneos, como por ejemplo, las oscilaciones que se aprecian en intervalos de medio segundo, o los instantes en los que la variación volumétrica es mayor que la unidad. Sin embargo, la tendencia y los valores obtenidos resultan próximos a los de la simulación.

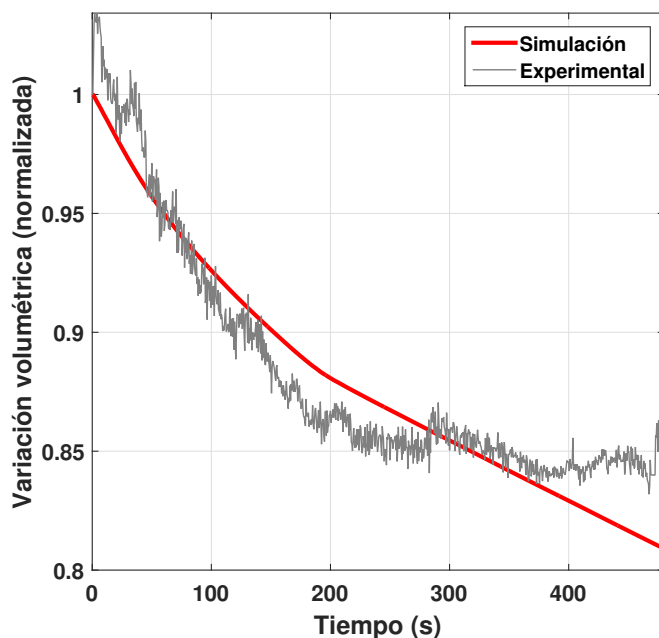


Figura 3.20: Resultados de la variación del volumen en los trozos de ternera.

En la figura 3.21 se muestra la evolución de la deformación que sufre la geometría completa en instantes equitativos de tiempo. Se aprecia que la mayor deformación aparece en la zona próxima a la sartén, mientras que en la parte central de la cara superior apenas hay deformación al ser la zona más fría del trozo de carne.

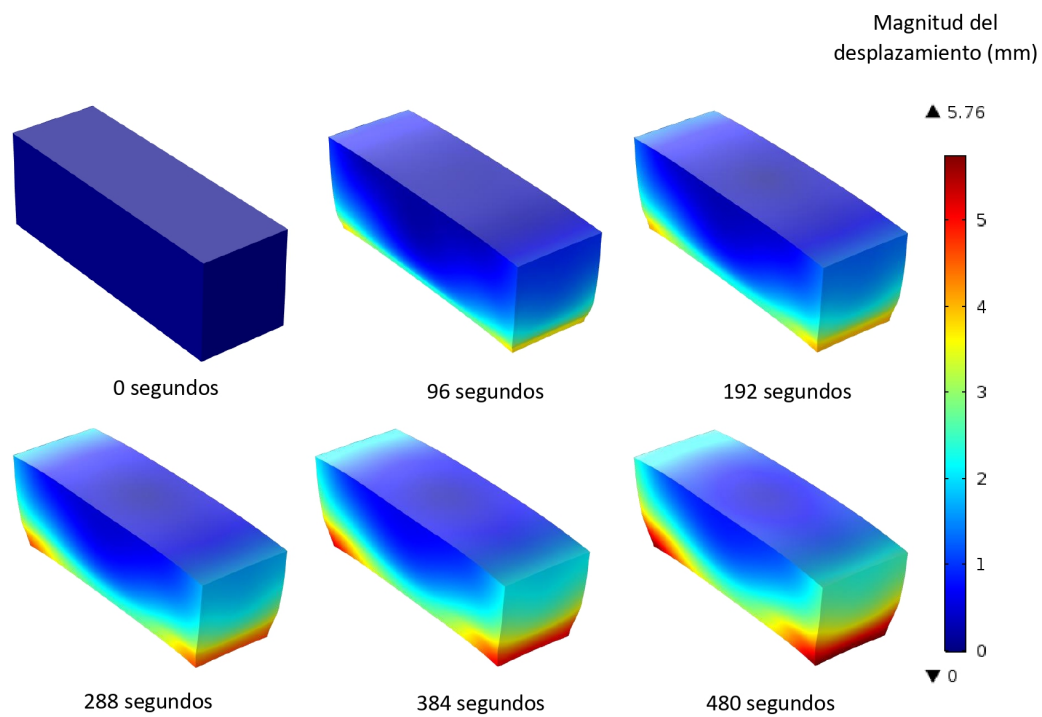


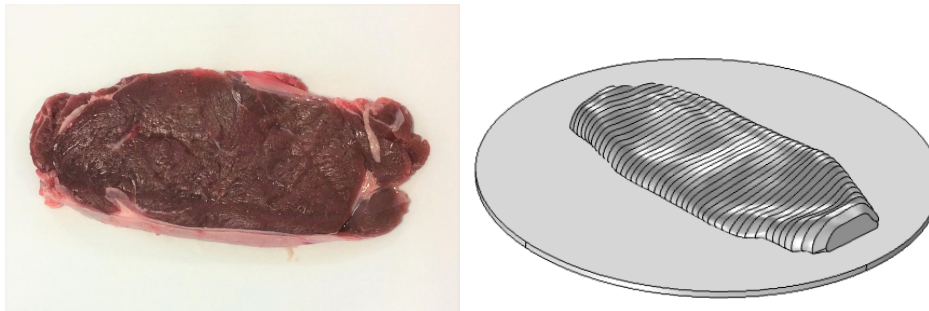
Figura 3.21: Evolución temporal de la magnitud del desplazamiento en la simulación del cocinado del trozo de ternera.

## 3.4. Modelo 3D con geometría realista

Uno de los objetivos del proyecto de colaboración con el grupo B\S\H era el de simular el máximo número posible de formatos de carne. Se acababan de evaluar positivamente los resultados para la hamburguesa y el trozo de ternera. Por ello, el siguiente paso ha sido estudiar la viabilidad del modelado de una pieza de mayor realismo como es el filete de ternera para simular su cocinado y la retracción que en él aparece.

### 3.4.1. Simulación del modelo

La geometría realista ha sido obtenida por medio del escaneado de las piezas empleadas durante la fase experimental en la Facultad de Veterinaria. Para ello se ha empleado un escáner 3D y se ha tratado posteriormente con el software de CAD *Rhinoceros 3D*. La obtención de estas geometrías se desarrolla en el apéndice A. En la figura 3.22 se incluye la comparativa entre uno de los filetes empleados en los ensayos y la geometría CAD empleada para la simulación.



(a) Filete crudo

(b) Geometría escaneada y sartén

Figura 3.22: Geometría del filete completo de ternera.

Sin embargo, el modelado de la retracción, trae consigo la limitación que supone establecer las condiciones de contorno para los desplazamientos. Por eso ha sido necesario construir un modelo de un cuarto de la geometría completa, en el que se aplican las correspondientes condiciones de simetría. Además de seguir siendo representativo del filete real, se logra reducir el tiempo de cálculo.

La malla empleada contiene 5870 elementos de los cuales 4447 están en la carne

(figura 3.23). El tiempo de cálculo para 8 minutos de simulación ha sido de 5 horas y 4 minutos. Las propiedades físicas del producto son las mismas que en el modelo para ternera con geometría simplificada que se han expuesto en la tabla 3.2.

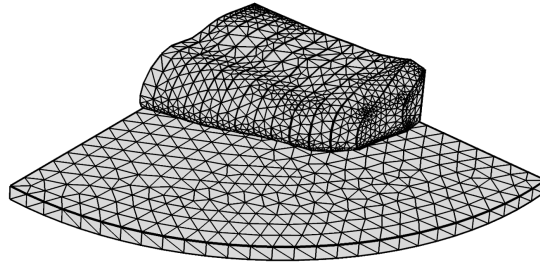
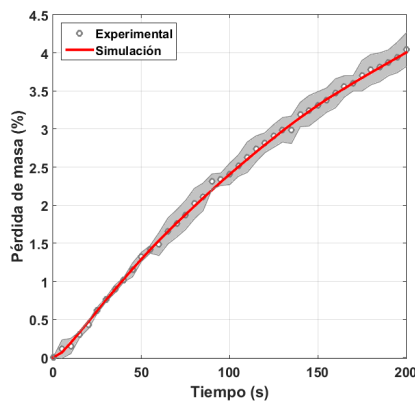


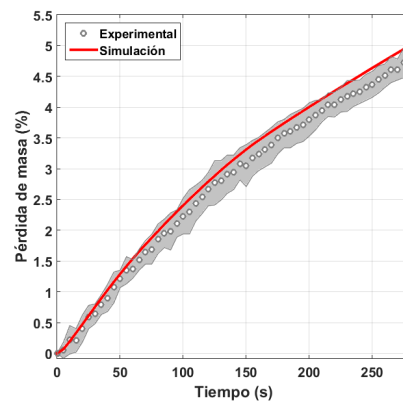
Figura 3.23: Malla empleada en la simulación del filete completo.

### 3.4.2. Validación del modelo

Los ensayos experimentales se realizaron para distintos puntos de cocinado en filetes de un grosor medio de 18 mm. Los empleados para la validación de este modelo han sido los ensayos de 200 segundos y 280 segundos por una cara. En la figura 3.24 se muestran los resultados simulados y experimentales de la pérdida de peso para ambos tiempos. Se puede observar que los resultados obtenidos se ciñen por completo a los de los ensayos, en los que cabe destacar además la baja variabilidad de las medidas.



(a) 200 segundos



(b) 280 segundos

Figura 3.24: Evolución de la pérdida de masa en los filetes de ternera.

Por el contrario, las temperaturas medidas en el punto central presentan oscilaciones de hasta diez grados centígrados (figura 3.25). Esto se debe fundamentalmente a las diferencias en los grosores de las muestras empleadas y a la dificultad a la hora de realizar la medida justo en la zona central. Aún con todo, los resultados obtenidos experimentalmente entran dentro del rango experimental.

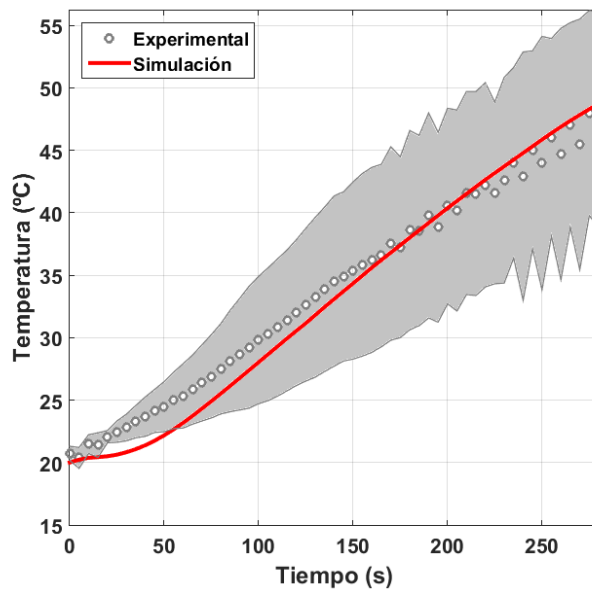


Figura 3.25: Temperatura en el punto medio del filete para el cocinado durante 280 segundos.

De la misma manera que se ha expuesto en los modelos previos, la retracción que aparece durante el cocinado del filete, se puede apreciar de manera cualitativa a lo largo del tiempo (figura 3.26). Es llamativo que en este caso, la retracción que se produce llega casi hasta los 10 mm en la zona inferior en contacto con la sartén, una magnitud superior a lo visto en el caso del trozo de ternera. La razón de ello puede ser que al no tener una estructura recta como en la geometría simplificada, la superficie expuesta al calor de la zona es mayor, y se traduce en un mayor grado de deformación.



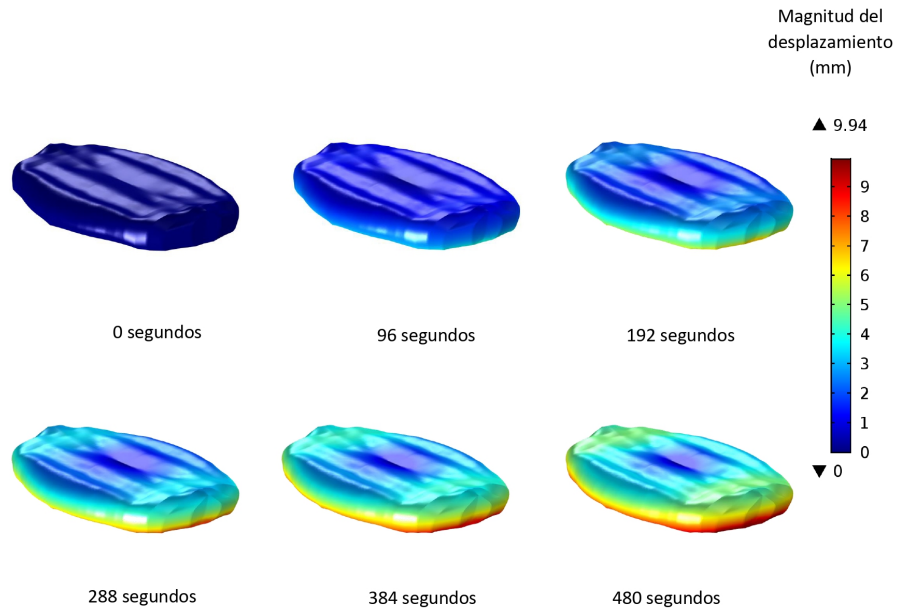


Figura 3.26: Evolución temporal de la magnitud del desplazamiento en la simulación del cocinado del filete.

De manera cuantitativa, se asemeja la variación de volumen con los resultados medidos y simulados para los trozos de ternera (figura 3.27).

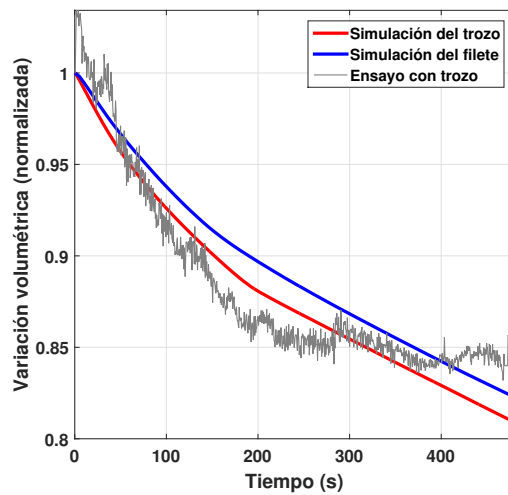


Figura 3.27: Resultados de la variación volumétrica en el filete comparada con los resultados en el trozo de ternera.

Una vez analizados los resultados satisfactoriamente en la geometría realista, cabe preguntarse cómo de diferentes son los resultados con respecto a los de la geometría simplificada. En primer lugar, en cuanto a la pérdida de masa, los valores obtenidos resultan ligeramente inferiores. Sin embargo, esto se debe a que el espesor en el modelo realista no es constante en toda la pieza, y por ello en global, la sección del modelo del filete es algo distinta a la del trozo simulado. En cualquier caso, los resultados de ambos modelos entran dentro del rango de los ensayos experimentales de los trozos (figura 3.28).

Para el caso de las temperaturas, el ajuste entre la geometría simplificada y la realista es mejor, teniendo en cuenta lo ya mencionado acerca de la variabilidad en las medidas experimentales del cocinado del filete (figura 3.29). Además, si se comparan en ambos modelos las distribuciones de temperatura en un corte al cabo de 8 minutos, se puede observar que son muy similares (figura 3.30).

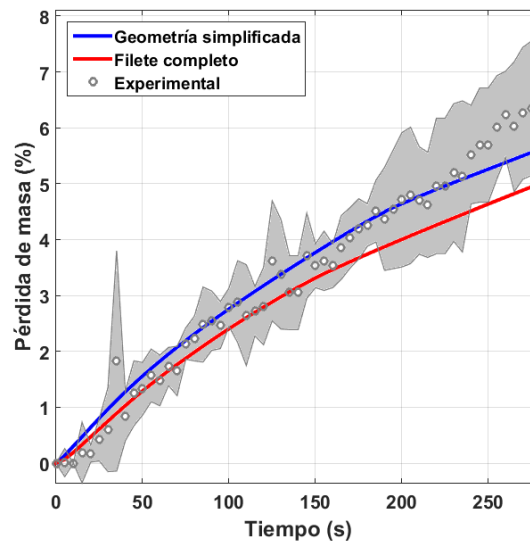


Figura 3.28: Resultados de la pérdida de masa durante 280 segundos para el modelo de la geometría simplificada y el realista.

Con todo ello se puede concluir, que la simulación de ambos modelos difiere principalmente en la forma exterior de la pieza y cómo ésta evoluciona a lo largo del cocinado, pero no tanto en los valores de las distintas variables de interés evaluadas.

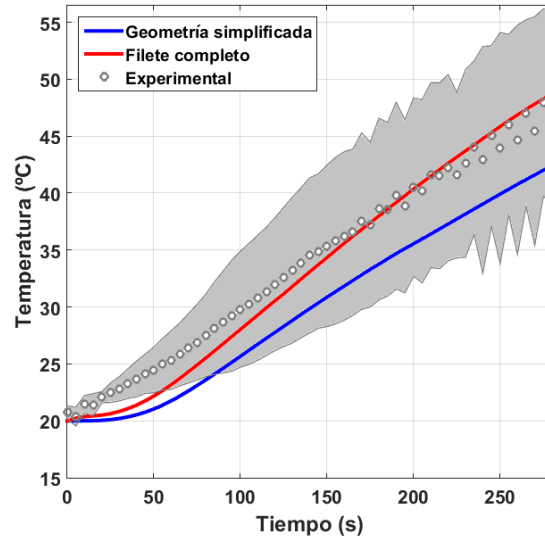


Figura 3.29: Resultados de la temperatura en el punto central durante 280 segundos para el modelo de la geometría simplificada y el realista.

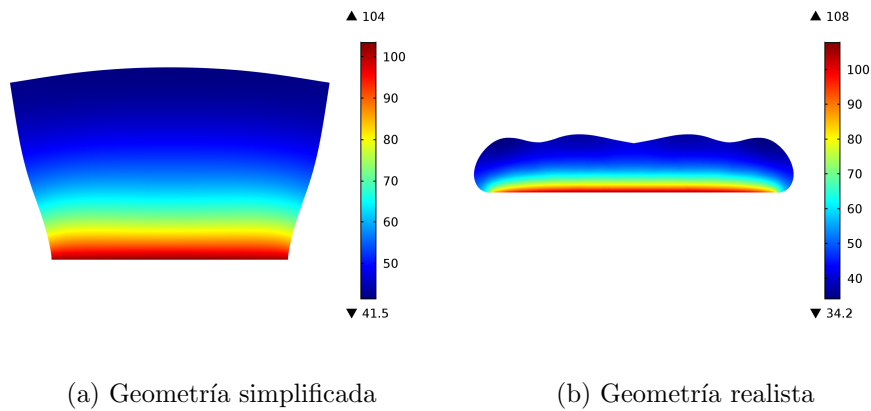


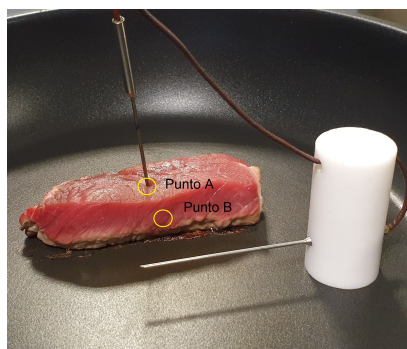
Figura 3.30: Distribución de temperaturas en el corte central al cabo de 8 minutos para la geometría simplificada y el filete. El espesor de cada sección son 17 y 18 mm respectivamente.

### 3.5. Efecto de los parámetros de la carne sobre los resultados

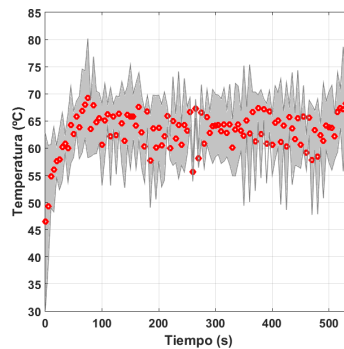
Una de las ventajas que supone la simulación de los procesos que tienen lugar durante el cocinado, es la posibilidad de realizar tantas simulaciones como se quiera variando aquellos parámetros que se desee, algo que de manera experimental, supondría un alto gasto económico y de tiempo. Por otro lado, la incertidumbre que conlleva la medida de algunos parámetros relevantes, lleva a la necesidad de estudiar el efecto que éstos pueden tener sobre la calidad del producto cocinado.

#### 3.5.1. Efecto de la temperatura exterior

El aire que rodea al trozo de carne se calienta por el efecto de la sartén por lo que no se puede considerar que la temperatura del aire sea la de la sala, por ejemplo 20°C. Este parámetro afecta al calentamiento por convección de las caras exteriores, calor que posteriormente se transmite al interior. Para cuantificar este efecto, se realizaron medidas de la temperatura en las proximidades de la carne, en la zona del lateral a unos 2 cm de la pieza, como se puede ver en la figura 3.31 a). Sin embargo, la gran variabilidad en la medida (figura 3.31 b), tan solo permitió confirmar que en esta zona la temperatura es mayor que la de la carne.



(a) Montaje para la medición de la temperatura exterior



(b) Evolución temporal de la temperatura exterior medida

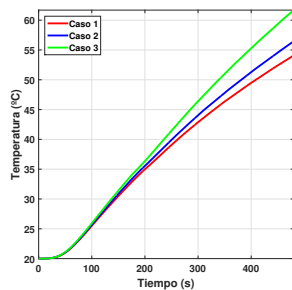
Figura 3.31: Medida experimental de la temperatura en las proximidades de la carne. Se indican los puntos ficticios A y B en los que se va a evaluar cómo afecta la temperatura ambiente.

Para ver este efecto en el modelo, se han estudiado tres casos de temperatura ambiente (tabla 3.3): uno en el que todo el aire circundante está a 20°C, otro en el que la temperatura son 60°C y un caso intermedio en el que la zona lateral está a 60°C y la zona superior, en la que la influencia de la sartén es menor, está a 20°C.

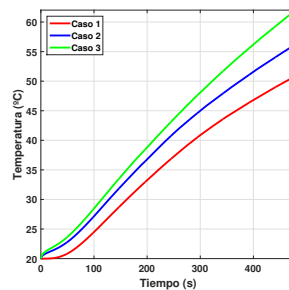
Caso	Temperatura en el lateral [°C]	Temperatura en la parte superior [°C]
1	20	20
2	60	20
3	60	60

Tabla 3.3: Temperaturas para cada caso del análisis del efecto de la temperatura exterior.

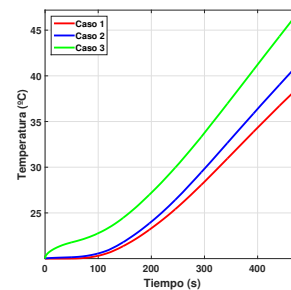
Para cada caso se ha estudiado la evolución de la temperatura en el punto central de la carne, en el centro de una de las caras laterales (punto B de la figura 3.31 a) y en el centro de la cara superior (punto A de la figura 3.31 a), ya que se ha considerado que éstos son los puntos en los que mejor se puede apreciar el efecto de la temperatura exterior (figura 3.32). Las diferencias de temperatura son hasta de 5 [°C] en el punto central y llegan hasta los 10 [°C] en la cara lateral, mientras que en la cara superior, la temperatura no llega a alcanzar los 60 [°C] del ambiente en los casos 2 y 3. Ésto se observa también en la figura 3.33, en la que se muestran cortes a distintas profundidades para el instante final. La distribución de temperaturas es muy parecida en todas las profundidades ya que el calor que llega a la superficie se transmite de manera casi integra a los puntos del interior.



(a) Temperatura en el punto central



(b) Temperatura en el centro de la cara lateral



(c) Temperatura en el centro de la cara superior

Figura 3.32: Perfiles de temperaturas en cada caso para distintos puntos.

A la vista de los resultados, se puede afirmar que tomar la misma temperatura en toda la zona próxima a la carne, lleva a distribuciones de temperaturas que no se ajustan a las reales en los puntos interiores. Por ello, el caso que se ha utilizado al considerarlo óptimo ha sido el de temperatura 60°C en la zona lateral y de 20°C en la zona superior, que sí se ciñe a lo obtenido en los ensayos (figura 3.16 a).

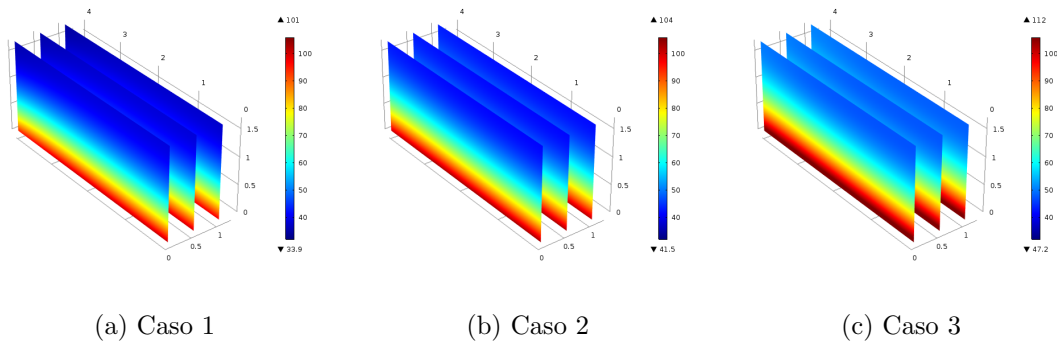


Figura 3.33: Distribución de temperaturas a distintas profundidades en el instante final (8 minutos).

### 3.5.2. Efecto del contacto térmico entre la carne y la sartén

El contacto entre la carne y la superficie de la sartén depende del parámetro  $H_c$  de conductividad térmica en dicho contacto y de la temperatura de la plancha. Como se ha visto en el apartado 3.3, la forma en que se modela este contacto afecta sensiblemente a los perfiles de temperatura en la parte inferior de la carne, haciendo que se produzca un calentamiento excesivo respecto al medido experimentalmente. A este hecho también contribuye la temperatura de la plancha. A día de hoy, los sistemas de control de B\S\H para la temperatura de la sartén, pueden presentar oscilaciones de hasta un 15 %, lo cual aumenta la incertidumbre en las temperaturas reales de la zona.

En cuanto al parámetro  $H_c$  cabe mencionar que no es medible, y por tanto, los valores empleados han sido fruto de la experiencia del grupo en proyectos similares y de los que se emplean en bibliografía. Sin embargo, en el actual TFG se ha querido realizar un análisis de sensibilidad del parámetro  $H_c$  de conductividad térmica en el contacto. Los valores considerados han sido 50, 60, 75 y 100 [ $W m^{-2}K^{-1}$ ].

En la figura 3.34 se recogen los resultados obtenidos para la temperatura en el punto central y cerca de la sartén. De esta forma se observa que el parámetro  $H_C$  ejerce una gran influencia sobre la zona inferior, y su efecto se reduce conforme se aleja de la plancha. A mayor valor del parámetro, mayor será el calentamiento en la superficie en contacto con la sartén y sus proximidades. Finalmente el valor que se ha considerado óptimo es el de  $50 [W (m^{-2}K)]$  ya que asegura el correcto ajuste de la temperatura central a la de los ensayos experimentales.

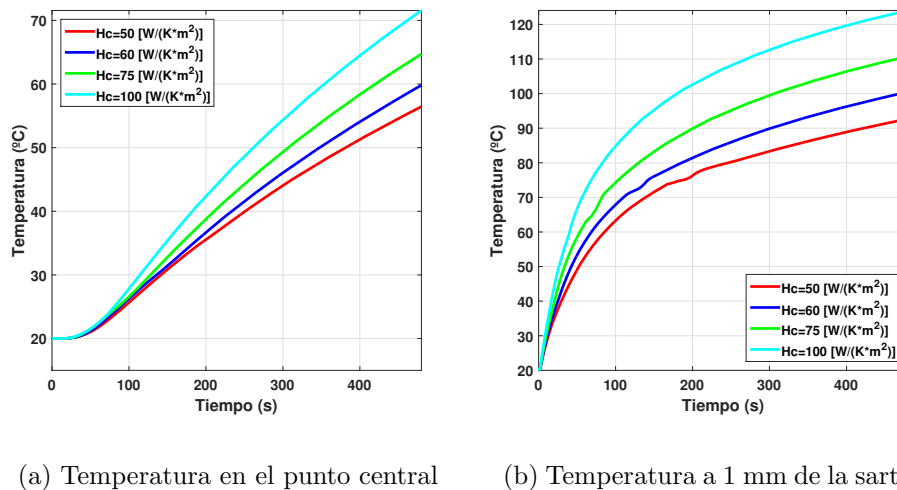


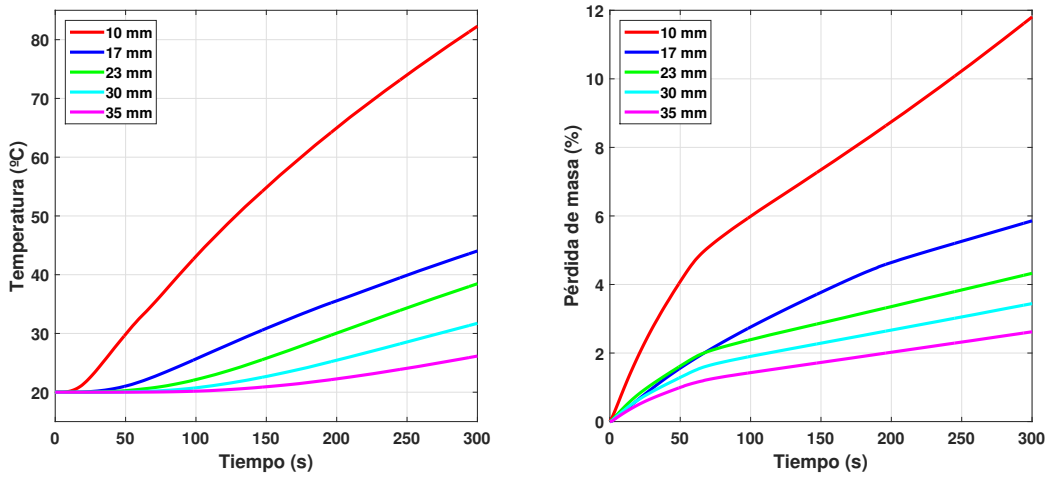
Figura 3.34: Perfiles de temperatura para cada valor de conductancia.

### 3.5.3. Efecto del espesor de la carne

El grosor de la pieza de carne cocinada es clave en el resultado final: a mayor espesor, más tiempo tarda en adquirir el punto deseado. Como se observa en la figura 3.35 a), el calentamiento se acelera para espesores menores, y en consecuencia, el tiempo necesario para alcanzar una cierta temperatura en el punto central de la pieza, se reduce considerablemente con tan solo disminuir unos pocos milímetros el espesor. La pérdida de masa al tener la misma tendencia que la temperatura, se acentúa para los espesores más pequeños (figura 3.35 b).

El efecto del espesor sobre la retracción tiene que ver con que el calentamiento en todos los puntos de la pieza es mayor y por tanto, se encoge más en los trozos

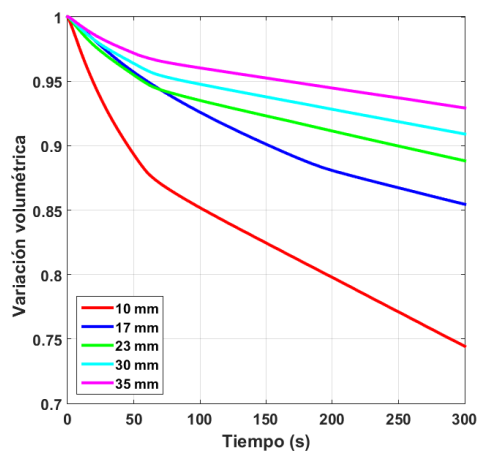
de espesor menor. En la figura 3.36 se recoge la variación volumétrica para cada espesor.



(a) Temperaturas en el punto central

(b) Pérdidas de masa

Figura 3.35: Cocinado de piezas con distintos espesores.



(a)

Figura 3.36: Variación volumétrica normalizada para distintos espesores.



La conclusión que se puede sacar, es que el factor geométrico más relevante a la hora de estudiar el cocinado de la carne y la retracción que ésta sufre, es el espesor. Esta influencia puede explicar la gran variabilidad en los resultados experimentales obtenidos para las distintas réplicas ensayadas. Aunque pertenecientes al mismo lomo de ternera, la variación de unos pocos mm en el espesor de unos filetes a otros se traduce en resultados dispersos.

### 3.5.4. Efecto de la difusividad

La difusividad del agua en el medio poroso depende del tipo de carne y su estructura interna. Es un parámetro difícilmente medible para cada caso, por lo que los valores empleados se han determinado mediante análisis inverso, es decir, seleccionando el valor que mejor reproduce los valores experimentales.

Este parámetro determina el grado en que la pieza pierde peso en forma de agua. En la figura 3.37 se realiza la comparativa para tres valores de difusividad: para  $2 \cdot 10^8$ ,  $3.5 \cdot 10^8$  y  $5 \cdot 10^8 [m^2 s^{-1}]$ . Como se puede apreciar, alterar su valor en menos de la mitad lleva a diferencias de pérdida de masa del 30 %.

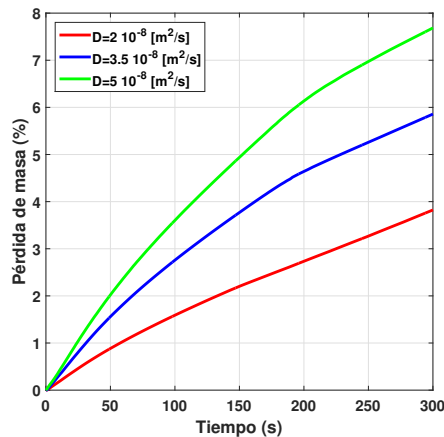


Figura 3.37: Pérdidas de masa para distintos valores de difusividad.

Sin embargo, uno de los efectos más llamativos observados durante la simulación es la gran influencia que tiene el valor tomado de la difusividad sobre los tiempos de cálculo: el valor de  $2 \cdot 10^8$  tarda aproximadamente unos 7 minutos mientras que el de  $5 \cdot 10^8$  tarda dos horas y diez minutos. Ésto se explica en que la convergencia del problema viene determinada en buena medida por este parámetro. El valor

escogido por su optimización en los tiempos de simulado y su mayor similitud con los resultados experimentales ha sido el de  $3.5 \cdot 10^8 [m^2 s^{-1}]$  (8 minutos de cálculo).

# Capítulo 4

## CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

### 4.1. Conclusiones

En este trabajo se ha implementado en el software de elementos finitos COMSOL un modelo multifísico, que considera el fenómeno de la retracción además de la transferencia de calor y masa que se produce en el cocinado de la carne. El modelo se basa en el proceso de desnaturalización de las proteínas, y de cómo el cambio estructural que éste produce se refleja a escala macroscópica en la retracción de la pieza. El modelo se ha particularizado para tres geometrías distintas como son la axisimétrica para la hamburguesa, la geometría 3D simplificada para el cocinado de trozos de ternera y la geometría 3D realista para el cocinado del filete completo.

Los resultados del modelo han sido comparados con éxito tanto con la bibliografía como con los ensayos experimentales, lo cual lleva a poder decir que el modelo se ha implementado correctamente y que es un modelo adecuado para poder simular el cocinado de carne mediante plancha, considerando además el fenómeno de la retracción. Sin embargo, queda pendiente una mejor evaluación de las propiedades térmicas en la zona de contacto entre la carne y la sartén, ya que a esto se le suma el no poder contar con unas mediciones lo suficientemente fiables en esta zona.

La excesiva temperatura en esta zona en los modelos, lleva a pensar que tal vez la carne no esté saturada en todo momento, y sea necesario considerar la fase gaseosa en el interior, lo cual pudiera explicar que parte del calor que se recibe no se emplee exclusivamente en elevar la temperatura, sino que se invierta en evaporar parte del agua en su interior.

El estudio que se ha hecho del efecto que tiene el espesor de la pieza sobre el resultado final, remarca de cara al futuro la importancia que puede llegar a tener sobre la variabilidad de los resultados o los ensayos experimentales.

Por otra parte, tras comparar los resultados obtenidos de la geometría prismática con los de la geometría realista, se llega a la conclusión de que no resulta interesante el estudio para geometrías reales, ya que con un gasto computacional sensiblemente mayor, los resultados son muy similares y se ajustan a los experimentales. Sin embargo, este modelo es una potente herramienta a la hora de visualizar la geometría deformada de un filete real tras el cocinado, ya que resulta mucho más intuitivo que verlo en un prisma.

En el aspecto de la retracción, al tratarse del primer trabajo en el grupo en el que se pretendía implementar dicho fenómeno, existía la incertidumbre de si se podrían obtener resultados válidos. Sin embargo, con los modelos desarrollados se han obtenido conclusiones favorables. Si bien es cierto, que es necesario implementar un sistema de medida de la retracción que aporte más información a parte de la variación volumétrica, así como un ajuste en el software de procesado de la imagen para reducir el ruido de la medida.

Destacar que el actual trabajo forma parte de un proyecto conjunto con la empresa B\S\H que pretende desarrollar un sistema de cocina guiado y semi-autónomo. Con los resultados obtenidos se llega a la conclusión de que la evolución temporal tanto de la temperatura, como de la variación de peso y de la deformación que sufre la carne, son parámetros relevantes que han de ser tenidos en cuenta durante el desarrollo de sistemas que aseguren la calidad durante el cocinado.

Para ello y con el objetivo de tener una mayor información en tiempo real, el desarrollo de sistemas realimentados donde se monitoricen valores de temperatura y pérdida de peso, permitirá un mejor ajuste de los parámetros, así como de un mejor conocimiento de los procesos internos que tienen lugar durante el cocinado.

## 4.2. Líneas futuras

Las futuras líneas de investigación propuestas para el estudio de la retracción de la carne durante el cocinado son las siguientes:

- Desarrollo de un modelo preciso capaz de simular el cocinado completo por las dos caras considerando la deformación que sufre la carne durante la primera vuelta.
- Investigación de posibles modelos de contacto entre la carne y la sartén capaces de ajustarse a los ensayos experimentales.
- Implementación de un modelo que considere la fase gaseosa en el interior de la carne.
- Desarrollo de una metodología de medida de la retracción basada en imágenes en 3D, que permita una comparación más precisa con el modelo.
- Incluir un modelado de la textura, que junto a la retracción y el color permitan al consumidor tener una perspectiva global del resultado tras el cocinado.
- Desarrollo de un sistema de realimentación en tiempo real que permita regular de manera más precisa el cocinado, como paso previo a los sistemas guiados de cocinado.



# Bibliografía

- V Fuertes Bueno. Simulacion numerica del proceso de cocinado mediante plancha y horno aplicado al cocinado de carne. 2018.
- I Pérez Salesa. Simulacion numerica del cocinado de carne en plancha. 2019.
- A Dhall and A K Datta. Transport in deformable food materials: a poromechanics approach. *Chemical Engineering Science*, 66(24):6482–6497, 2011.
- T Gulati and A K Datta. Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *Journal of Food Engineering*, 166: 119–138, 2015.
- S Barbera and S Tassone. Meat cooking shrinkage: Measurement of a new meat quality parameter. *Meat Science*, 73(3):467–474, 2006.
- AK Datta. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. i: Problem formulations. *Journal of food engineering*, 80(1): 80–95, 2007.
- J N Ikediala, LR Correia, GA Fenton, and N Ben-Abdallah. Finite element modeling of heat transfer in meat patties during single-sided pan-frying. *Journal of Food Science*, 61(4):796–802, 1996.
- AJ Fowler and A Bejan. The effect of shrinkage on the cooking of meat. *International journal of heat and fluid flow*, 12(4):375–383, 1991.
- S M Goñi and VO Salvadori. Prediction of cooking times and weight losses during meat roasting. *Journal of Food Engineering*, 100(1):1–11, 2010.

- A Kondjoyan. A review on surface heat and mass transfer coefficients during air chilling and storage of food products. *International Journal of Refrigeration*, 29(6):863–875, 2006.
- AH Feyissa, KV Gernaey, and J Adler-Nissen. 3d modelling of coupled mass and heat transfer of a convection-oven roasting process. *Meat science*, 93(4):810–820, 2013.
- RGM Van der Sman. Modeling cooking of chicken meat in industrial tunnel ovens with the flory–rehner theory. *Meat science*, 95(4):940–957, 2013.
- L Mayor and AM Sereno. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of food engineering*, 61(3):373–386, 2004.
- ME Katekawa and MA Silva. A review of drying models including shrinkage effects. *Drying technology*, 24(1):5–20, 2006.
- J Zhang, AK Datta, and S Mukherjee. Transport processes and large deformation during baking of bread. *AIChE Journal*, 51(9):2569–2580, 2005.
- RGM Van der Sman. Moisture transport during cooking of meat: An analysis based on flory–rehner theory. *Meat science*, 76(4):730–738, 2007.
- L Vujosevic and VA Lubarda. Finite-strain thermoelasticity based on multiplicative decomposition of deformation gradient. *Theoretical and applied mechanics*, 28(29):379–399, 2002.
- Y Choi and M R Okos. Effects of temperature and composition on thermal properties of foods. *Journal of Food Process and Applications*, 1(1):93–101, 1986.



# Anexos



## ENSAYOS EXPERIMENTALES DEL COCINADO EN CARNE

Como se ha apuntado en la introducción de la memoria, el presente TFG forma parte de un proyecto de colaboración con el grupo de investigación de Alimentos de Origen Vegetal de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza. Este grupo ha sido el encargado de realizar los ensayos experimentales de cocinado en plancha, para poder validar el modelo numérico implementado en ternera y la influencia de los distintos parámetros de la carne en la apariencia y propiedades del resultado final. Por otra parte, durante la realización de estos ensayos, se aprovechó para desarrollar una metodología de medida de la retracción. En este anexo se describen brevemente tanto los equipos como los elementos necesarios para cuantificar el fenómeno de la retracción además de la metodología seguida para obtener las geometrías realistas de los filetes.

### **A.1. Equipos utilizados**

En los siguientes apartados, se realiza una breve descripción de los equipos utilizados durante la fase experimental, para la medida de la pérdida de masa de la carne y la temperatura en distintos puntos de la misma. Como ya se ha dicho, todos los ensayos experimentales fueron desarrollados en el laboratorio de la facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza.

## Placa de calentamiento

El sistema de calentamiento lo compone una placa de inducción de la marca BOSCH, modelo PIB675L34E. En la misma se incluyen dos sistemas diferentes de control de temperatura denominados *frying sensor* y *cooking sensor*. El propósito del primero de ellos es el de anticiparse a que el aceite de la sartén se queme. Para el actual estudio, esta característica no resulta de interés. Sin embargo el segundo es utilizado para mantener la temperatura de la sartén constante a  $215^{\circ}\text{C}$  (figura A.1).

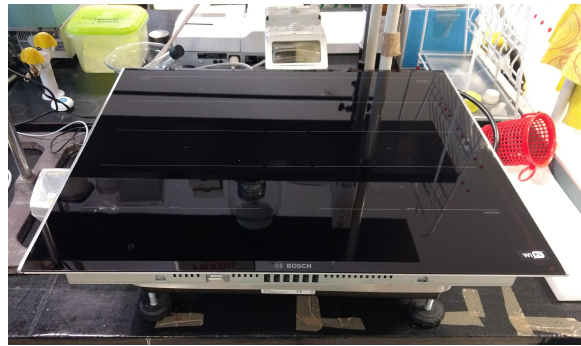


Figura A.1: Sistema de inducción empleado durante los ensayos experimentales.

## Balanza

El equipo empleado para medir el peso de la carne de manera continua, fue una báscula situada bajo la placa de inducción. El modelo DS30K0.1L de la compañía alemana Kern & Sohn, cuenta con una precisión de 0.1 g, con un límite de peso de hasta 30 kg, y recaba datos con una frecuencia de 1 segundo.

## Termopar

La temperatura en los distintos puntos de la carne, fue medida por punción tipo T con un termopar de 1.5 mm de diámetro conectado a un aparato de registro de datos, modelo 177-T4 de la compañía alemana Testo (figura A.2).

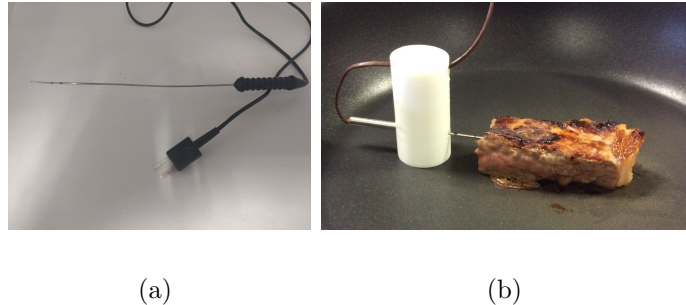


Figura A.2: La figura a) muestra el termopar utilizado para medir la temperatura. En la figura b) se muestra el montaje necesario para la correcta medida de los datos.

## A.2. Medida de la retracción

El estudio computacional de la retracción no ha sido habitualmente tratado en la bibliografía como se ha expuesto en el apartado 2.2. En consecuencia, las metodologías desarrolladas para la medida del fenómeno son escasas y las que hay, generalmente se limitan a geometrías sencillas como la hamburguesa en Barbera and Tassone (2006) o basadas en la medición del desplazamiento de unos pocos puntos en la altura o diámetro de la pieza como en Dhall and Datta (2011).

Para el actual TFG, se ha pretendido desarrollar una metodología basada en imágenes de vídeo de la pieza de carne durante el cocinado desde distintas perspectivas. De esta manera, a través de análisis de visión por ordenador, es posible obtener la deformación de los contornos completos, así como la variación del área conforme va teniendo lugar la retracción.

### A.2.1. Montaje

Para definir la deformación que sufre la carne en todas las direcciones del espacio, es necesario grabar desde dos perspectivas. Las elegidas fueron la frontal, para cuantificar las variaciones en la altura; y la planta (figura A.3 b). Las cámaras tipo *GoPro* empleadas fueron *EKEN H9* con trípode fijo para la frontal, y flexible en el caso de la superior, con el propósito de facilitar la sujeción (figura A.3 a). Ésta última, al capturar la zona más fría de la carne, y por tanto, la zona que menos deformación sufre por su menor calentamiento, resulta ser el plano que menos información aporta de los dos tomados.



(a) Montaje para la medida

(b) Arriba, frame de la cámara frontal. Abajo, frame de la cámara superior

Figura A.3: Montaje y capturas del vídeo para la medida de la retracción.

### A.2.2. Software de visión por ordenador

El software empleado ha sido *Tracker* desarrollado por Don Andrés Mena Tobar, miembro del Grupo de Applied Mechanics and Bioengineering del Departamento de Mecánica. El programa procesa frame a frame el color en escala RGB de cada pixel, y por medio de inteligencia artificial, es capaz de reconocer aquellas regiones que comparten una composición cromática similar (figura A.4). Por medio del ajuste de parámetros como la exposición o el contraste de la imagen, se puede delimitar de manera precisa aquellas zonas que resultan de interés, fijando los colores que se quieren *trackear*.

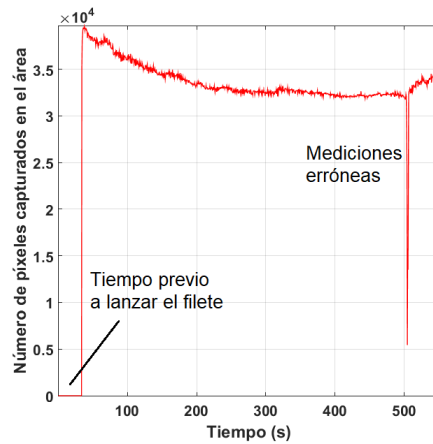
### A.2.3. Resultados

Para cuantificar la variación del área capturada en el perfil (que incluye además una parte de la cara superior), se relaciona el número de píxeles incluidos en el interior del contorno reconocido en cada instante, con el número en el primer momento de estudio. De esta forma se obtiene una aproximación de cómo evoluciona el volumen de la pieza durante el tiempo.

Una de las desventajas que presenta éste método de análisis, es que aparece ruido en la medida de los contornos, y por ello es necesario postprocesar los datos obtenidos a fin de eliminar aquellos valores que no concuerdan (figura A.5).



Figura A.4: Reconocimiento de los contornos en uno de los frames de la imagen del perfil.



(a) Valores antes del postproceso

(b) Frame de un instante en el que el área capturada es errónea

Figura A.5: Evolución del área capturada y medidas erróneas.

De cara al futuro, será necesario mejorar la captura de la imagen para poder delimitar de manera más precisa la planta, el perfil y el alzado de la pieza estudiada. Sin embargo, como primera aproximación para la medida de la retracción resulta útil

para confirmar que los modelos siguen la tendencia y la magnitud de lo observado experimentalmente.

### A.3. Escáner de las geometrías realistas

Para determinar la geometría del filete de carne, se ha empleado el escáner *Structure by occipital* (figura A.6). Las mediciones han sido realizadas durante la validación del modelo para los distintos puntos de cocinado. Sin embargo en la práctica, se comprobó la dificultad a la hora de capturar con precisión la magnitud de las dimensiones tanto en los trozos como en el filete entero de carne. La principal causa de este hecho es el empleo de ternera en la experimentación. Al tratarse de cortes del lomo especialmente tiernos, poseen una escasa fibrosidad y una alta deformabilidad en crudo. Esto se traduce en que a la hora de manipularlo y colocarlo en el área de escaneado pueden variar considerablemente sus dimensiones, especialmente la planta del filete. Esto mismo sucedía en el postcocinado cuando se pretendía valorar la pérdida de volumen.



Figura A.6: Dispositivo de escaneo empleado durante la experimentación (imagen comercial de la web de *Structure by occipital*).

En contraposición, el uso del escáner resulta una herramienta útil y rápida para obtener geometrías morfológicamente realistas para implementarlas en el software de elementos finitos. Permite capturar la superficie irregular de las paredes y la cara superior, así como la base con forma orgánica, difícilmente imitable por medio de diseño de CAD.

El postprocesado se ha realizado con el software de CAD *Rhinoceros 3D*. A partir de la malla que obtiene el escáner, el programa genera una geometría 3D que se puede



implementar como geometría inicial en COMSOL (figura A.7). Para garantizar la semejanza con la realidad, se llevo a cabo un reescalado de las piezas obtenidas en base a su espesor, ya que como se ha podido ver, ésta es la dimensión más influyente en el proceso de cocinado. Ya que los filetes de la experimentación han tenido un grosor medio de 18 mm, se ha fijado como grosor medio de la pieza escaneada este valor, y se han redimensionado el resto de dimensiones con un factor proporcional.

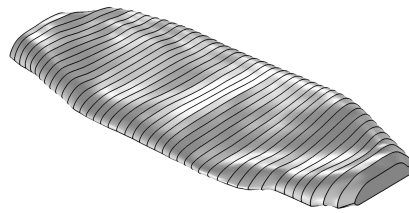


Figura A.7: Geometría 3D del filete de ternera generada en el programa de CAD e importada en COMSOL.