



ROBLEDO DE ALMEIDA TORRES FILHO

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA CARNE
BOVINA DE NELORE E ABERDEEN ANGUS
DURANTE A MATURAÇÃO POR *BIOSPECKLE*
*LASER***

LAVRAS - MG

2015

ROBLEDO DE ALMEIDA TORRES FILHO

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA CARNE BOVINA DE NELORE E
ABERDEEN ANGUS DURANTE A MATURAÇÃO POR *BIOSPECKLE*
*LASER***

Tese apresentada à Universidade Federal
de Lavras, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Ciência
dos Alimentos, para a obtenção do título
de Doutor.

Orientador

Dr. Eduardo Mendes Ramos

Coorientador

Dr. Roberto Alves Braga Júnior

LAVRAS - MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Torres Filho, Robledo de Almeida.

Avaliação da qualidade da carne bovina de Nelore e Aberdeen Angus durante a maturação por *Biospeckle Laser* / Robledo de Almeida Torres Filho. – Lavras : UFLA, 2015.

108 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2015.

Orientador: Eduardo Mendes Ramos.

Bibliografia.

1. *Bos indicus*. 2. *Bos taurus*. 3. Cor. 4. Maciez. 5. Momento de Inércia. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

ROBLEDO DE ALMEIDA TORRES FILHO

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA CARNE BOVINA DE NELORE E
ABERDEEN ANGUS DURANTE A MATURAÇÃO POR *BIOSPECKLE*
*LASER***

Tese apresentada à Universidade Federal
de Lavras, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Ciência
dos Alimentos, para a obtenção do título
de Doutor.

APROVADA em 10 de Abril de 2015.

Dr. ^a . Alcinéia de Lemos Souza Ramos	UFLA
Dr. Roberto Alves Braga Júnior	UFLA
Dr. Paulo Rogério Fontes	UFV
Dr. Mário Luiz Chizzotti	UFV

Dr. Eduardo Mendes Ramos
Orientador

**LAVRAS - MG
2015**

*A meus pais, Robledo e Elmira, por tudo que sou,
a minha irmã Lívia, minha melhor amiga,
e a minha esposa Vanelle, pelo amor,
dedico este trabalho.*

*“Tentar sempre, vencer se possível,
desistir jamais!
Você não é o dono do mundo,
mas é um dos filhos do dono.”*

(Autor desconhecido)

AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre presente, mesmo nos meus momentos de solidão.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade de realização do curso de Doutorado em Ciência dos Alimentos.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela liberação para a realização do curso de Doutorado em Ciência dos Alimentos na UFLA.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa e pelo apoio financeiro ao projeto de Doutorado.

Ao meu orientador, prof. Eduardo Mendes Ramos, pelos ensinamentos, pela orientação e pela amizade.

Aos meus coorientadores, prof^a. Alcinéia de Lemos Souza Ramos e prof. Roberto Alves Braga Júnior, pelos ensinamentos, pela amizade e pelas sugestões para o aprimoramento deste trabalho.

Ao prof. Paulo Rogério Fontes e ao prof. Mário Luiz Chizzotti, pela disponibilidade, pelos ensinamentos e pelas sugestões para o aprimoramento deste trabalho.

Ao prof. Márcio Machado Ladeira pela disponibilidade e pela parceria na realização dos experimentos na área de qualidade de carnes.

Ao prof. Lúcio Alberto de Miranda Gomide, pela realização de parte do experimento no Laboratório de Análise de Carnes e Derivados (LACD) do Departamento de Tecnologia de Alimentos (DTA) da UFV, pelos ensinamentos e pela amizade.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, pelos ensinamentos e por terem contribuído para a minha formação.

Aos funcionários do Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA), pela atenção, pelo estímulo e pela disponibilidade.

Ao laboratorista José Vandick Lopes e a sua esposa Luzia da Consolação Bitarães Lopes, pela amizade, pelo incentivo e pela colaboração na realização deste trabalho.

Aos colegas dos cursos de graduação e pós-graduação em Zootecnia da UFLA e da UFV pela colaboração na criação e abate dos animais.

À Carolina, Ísis, Mariana e Paulo Rogério por participarem do experimento, sem os quais não seria possível realizá-lo.

À equipe e aos amigos do Laboratório de Tecnologia de Carnes e Derivados (*LabCarnes*) e do Núcleo de Estudos em Produtos de Origem Animal (NEPOA), Abel, Ana Alice, Ana Paula, Andressa, Bruna, Carolina, Cecília, Cristiane, Daynna, Douglas, Élide, Érika, Gabriela, Gisele, Henrique, Ísis, Ítalo, Ligiane, Lethícia, Monalisa, Sinthia, Thales, Thaís e Thayná, pelo companheirismo e pelos momentos de descontração e alegria.

Aos amigos do DCA, pelas horas de estudo e de companheirismo e pelos momentos de descontração e alegria.

À minha avó Adalgisa, pelo exemplo de vida e de sabedoria.

Aos meus pais, Robledo e Elmira, pelo exemplo, pelo amor e incentivo incondicionais, pela vida, enfim, por tudo.

A minha irmã Lívia, pelo carinho, pela preocupação e pela amizade e companheirismo.

A minha esposa Vanelle, pelo carinho, pelo companheirismo, pelo incentivo e pela compreensão.

A minha “família de Lavras” Eduardo, Alcinéia, Maria Eduarda e Matheus por me acolherem, pela grande amizade e pelos momentos de diversão e alegria.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO GERAL

O objetivo desse estudo foi avaliar o uso do *Biospeckle laser*, associado à análise da atividade biológica, na predição da qualidade da carne bovina durante a maturação por meio de uma configuração experimental que permitisse a análise fora de um laboratório de ótica. A atividade biológica de um material, mensurada pelo *Biospeckle laser*, pode ser expressa por meio de um parâmetro numérico, o Momento de Inércia (MI). A carne de Nelore apresentou ($P < 0,05$) menores pH, comprimento do sarcômero (CS), capacidade de retenção de água (CRA) e índice de fragmentação miofibrilar (IFM), e maior força de cisalhamento (FC) que a carne de Angus. Houve ($P < 0,05$) aumento da purga até o 14° dia de maturação, mais pronunciado na carne de Nelore. A perda de peso por cozimento (PPC) aumentou ($P < 0,05$) até o 14° dia de maturação. Apenas o pH do 14° dia e o CS do 21° dia de maturação foram ($P < 0,05$) menores que aqueles do tempo zero, porém permaneceram dentro das faixas consideradas normais. O IFM do tempo zero foi ($P < 0,05$) menor que aquele do 7° dia de maturação, o qual foi ($P < 0,05$) menor que o IFM aos 21 dias de maturação. O IFM do 14° dia de maturação foi ($P > 0,05$) semelhante àqueles dos seus tempos adjacentes. Para os tempos de maturação avaliados, a FC do tempo posterior sempre foi ($P < 0,05$) menor que aquela do tempo anterior em razão do aumento do nível de proteólise ($r = -0,62$). O IFM foi ($P < 0,05$) positivamente correlacionado ($r = 0,53$), enquanto que a FC foi ($P < 0,05$) negativamente correlacionada ($r = -0,62$) com o tempo de maturação. Nos primeiros sete dias de maturação ocorreu ($P < 0,05$) o principal aumento do conteúdo relativo de oximioglobina (O_2Mb) com redução ($P < 0,05$) do conteúdo relativo de deoximioglobina (Mb^+). Apenas na carne de Nelore, o valor de luminosidade (L^*) aumentou ($P < 0,05$) ligeiramente (1,18) até o 14° dia de maturação. O valor do índice de vermelho (a^*) aumentou ($P < 0,05$) até o 14° dia de maturação, mas

no 21° dia foi ($P>0,05$) semelhante àqueles do 7° e do 14° dia de maturação. Os valores do índice de amarelo (b^*) e da saturação (C^*) do tempo zero foram ($P<0,05$) menores que aqueles dos demais tempos de maturação. Os MI da carne de Nelore foram ($P<0,05$) maiores que aqueles da carne de Angus nas amostras desembaladas com a história temporal do padrão do speckle (THSP) construída com a linha central. O tempo de maturação afetou ($P<0,05$) os MI, porém sem um comportamento padrão e apresentando ($P<0,05$) correlações fracas ($r<0,46$). Os MI ($P<0,05$) se correlacionaram positivamente com purga, PPC, IFM, L^* , a^* , b^* , C^* , h^* (ângulo de tonalidade) e O_2Mb , e negativamente com pH, FC, Mb^+ e conteúdo relativo de metamioglobina (MMb). Contudo, essas correlações foram ($P<0,05$) fracas ($-0,42<r<0,50$). Portanto, com o *setup* empregado, o *Biospeckle laser*, associado à análise do MI, não alcançou o potencial técnico esperado na predição da qualidade da carne bovina durante a maturação. Mais estudos são necessários para o desenvolvimento do *Biospeckle laser* para a avaliação da qualidade de carnes em condições industriais.

Palavras-chaves: *Bos indicus*. *Bos taurus*. Cor. Maciez. Momento de Inércia.

GENERAL ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the use of Biospeckle laser, associated with the analysis of the biological activity, to predict the beef quality during aging by an experimental setup that enables the analysis out of an optical laboratory. The biological activity of a material, measured by the Biospeckle laser, can be expressed by a numerical parameter, the Inertia Moment (IM). The Nellore beef had ($P<0.05$) lower pH, sarcomere length (SL), water holding capacity (WHC) and myofibrillar fragmentation index (MFI), and higher shear force (SF) than Angus beef. Purge increased ($P<0.05$) up to the 14th aging day, the most pronounced case being in the Nellore beef. Cooking loss (CL) increased ($P<0.05$) until the 14th aging day. Only the 14th-aging-day-pH and 21th-aging-day-SL were ($P<0.05$) lower than those of time zero, but remained within the range considered normal. The MFI of time zero was ($P<0.05$) lower than that of the 7th aging day, which was ($P<0.05$) lower than the MFI after 21 aging days. The MFI after 14 aging days was ($P>0.05$) similar to those of its adjacent times. For the evaluated aging times, the SF of following time was ($P<0.05$) always lower than that of the previous time due to the increased level of proteolysis ($r = -0.62$). The MFI was ($P<0.05$) positively correlated ($r = 0.53$), while the SF was ($P<0.05$) negatively correlated ($r = -0.62$), with aging time. The main increase in the relative content of oxymyoglobin (O_2Mb) occurred ($P<0.05$) in the first seven aging days, with a reduction ($P<0.05$) in the relative content of deoxymyoglobin (Mb^+). The luminosity (L^*) value increased ($P<0.05$) slightly (1.18) until the 14th aging day only in Nellore beef. The red component (a^*) value increased ($P<0.05$) up to the 14th aging day, but the a^* value of 21th aging day was ($P>0.05$) similar to those of the 7th and 14th aging days. The yellow component (b^*) and saturation index (C^*) values at time zero were ($P<0.05$) lower than those of other aging times. The IM of Nellore beef

were ($P<0.05$) higher than those of Angus beef in the unpacked samples with temporal history speckle pattern (THSP) constructed with the center row. The aging time affected ($P<0.05$) IM, but without a response pattern, and with ($P<0.05$) weak correlations ($r<0.46$). The IM were correlated ($P<0.05$) positively with purge, CL, MFI, L^* , a^* , b^* , C^* , h^* (hue angle) and O_2Mb , and negatively with pH, SF, Mb^+ and relative content of metmyoglobin (MMb). However, these correlations were ($P<0.05$) weak ($-0.42<r<0.50$). Therefore, the adopted setup of Biospeckle laser, associated with the IM analysis, did not achieve the expected technical potential in predicting beef quality during aging. Further studies are needed to develop the Biospeckle laser for the evaluation of beef quality in industrial conditions.

Keywords: *Bos indicus*. *Bos taurus*. Color. Tenderness. Inertia Moment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Configuração do <i>Biospeckle laser</i>	44
Figura 2 <i>Speckle</i> capturado após a iluminação de papel branco por um laser. ..	44
Figura 3 Construção da História Temporal do Padrão do <i>Speckle</i> (THSP).	46
Figura 4 História Temporal do Padrão do <i>Speckle</i> (THSP) de uma amostra com (a) baixa atividade e (b) alta atividade.....	47
Figura 5 (a) História Temporal do Padrão do <i>Speckle</i> (THSP) e (b) Matriz de Ocorrência (MOC) de uma amostra com baixa atividade.	48
Figura 6 (a) História Temporal do Padrão do <i>Speckle</i> (THSP) e (b) Matriz de Ocorrência (MOC) de uma amostra com alta atividade.	48
Figura 7 Configuração experimental do <i>setup</i> móvel do <i>Biospeckle laser</i>	59
Figura 8 <i>Speckle</i> capturado por (a) Amaral et al. (2013) e no (b) presente experimento. Binarização com 30 - 65 (c) da imagem (a) e (d) da imagem (b). Histograma de distribuição de frequência do tamanho das partículas (e) da imagem (c) e (f) da imagem (d).	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Aplicações de técnicas emergentes na predição de indicadores de qualidade da carne bovina.....	38
Tabela 2 Efeitos da raça e do tempo de maturação sobre os indicadores de qualidade de carne	62
Tabela 3 Efeitos do tempo de maturação sobre a purga dentro de cada raça.....	62
Tabela 4 Correlação de <i>Pearson</i> entre os indicadores de qualidade de carne ...	64
Tabela 5 Efeitos da raça e do tempo de maturação sobre os indicadores de cor de carne.....	69
Tabela 6 Efeitos do tempo de maturação sobre luminosidade (L^*) e conteúdo relativo de oximioglobina (O_2Mb) dentro de cada raça.....	69
Tabela 7 Correlação de <i>Pearson</i> entre os indicadores de cor de carne.....	72
Tabela 8 Efeitos da raça e do tempo de maturação sobre os momentos de inércia	76
Tabela 9 Correlação de <i>Pearson</i> entre os momentos de inércia das amostras embaladas	79
Tabela 10 Correlação de <i>Pearson</i> entre os momentos de inércia das amostras desembaladas	80
Tabela 11 Correlação de <i>Pearson</i> dos momentos de inércia das amostras embaladas com os momentos de inércia das amostras desembaladas	81
Tabela 12 Correlação de <i>Pearson</i> dos momentos de inércia com os indicadores de qualidade de carne	83
Tabela 13 Correlação de <i>Pearson</i> entre os momentos de inércia e os indicadores de cor de carne.....	84

SUMÁRIO

1	Introdução.....	16
2	Referencial teórico.....	18
2.1	Qualidade da carne bovina	18
2.1.1	Cor.....	20
2.1.2	Capacidade de retenção de água (CRA).....	24
2.1.3	Maciez	28
2.2	Maturação.....	31
2.3	Raça.....	34
2.4	Técnicas emergentes de avaliação da qualidade.....	37
2.5	<i>Biospeckle laser</i>	43
2.6	Momento de inércia.....	45
2.7	Aplicações do <i>Biospeckle laser</i>	51
3	Material e Métodos.....	53
3.1	Animais	53
3.2	Abate dos animais e coleta das amostras.....	54
3.3	Purga.....	55
3.4	pH.....	55
3.5	Capacidade de retenção de água (CRA).....	55
3.6	Índice de fragmentação miofibrilar (IFM).....	55
3.7	Comprimento do sarcômero (CS).....	56
3.8	Perda de peso por cozimento (PPC)	56
3.9	Força de cisalhamento (FC).....	57
3.10	Cor instrumental.....	57
3.11	Formas químicas da mioglobina.....	57
3.12	<i>Biospeckle laser</i> e momento de inércia	58
3.13	Análise estatística	60

4	Resultados e Discussão.....	61
4.1	Retenção de água e maciez.....	61
4.2	Cor e forma químicas da mioglobina..	68
4.3	Momentos de inércia	75
4.4	Momentos de inércia e indicadores de qualidade	82
5	Conclusão	91
6	Referências bibliográficas.....	92

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, apenas a garantia de um alimento seguro já não é suficiente para atender às expectativas dos consumidores mais exigentes, os quais estão dispostos a pagar mais caro por garantia de qualidade, principalmente, quanto à cor e maciez da carne bovina. Isso ocorre porque a cor da carne bovina *in natura* é o principal atributo de qualidade percebido pelo consumidor no ato de compra, sendo utilizada como um sinal, nem sempre correto, de frescor, salubridade, conservação e da qualidade durante o consumo. Já a maciez é considerada o atributo de qualidade mais importante, procurado e associado à satisfação e a uma futura compra pelos consumidores.

Desse modo, a predição da qualidade da carne bovina se torna determinante para o sucesso da indústria frigorífica. Existem vários métodos, sensoriais e instrumentais, para a avaliação da qualidade da carne bovina. No entanto, a maioria desses métodos analíticos apresenta execução complexa e demorada, custo elevado, além de ser destrutiva, não sendo viável para a indústria da carne. Desse modo, uma técnica que possa prever rápida e eficientemente a qualidade da carne bovina, ainda no frigorífico, é desejável para proporcionar uma melhor estratificação das carcaças por qualidade e aumentar os ganhos econômicos da cadeia produtiva.

Diversas tecnologias têm sido propostas como alternativas a esses métodos analíticos convencionais. Entre as tecnologias emergentes em estudo, os métodos óticos têm o maior potencial de aplicação em linha por serem rápidos, não destrutivos e de baixo custo. Pesquisas têm sido realizadas, principalmente, com imagens de vídeo, computacionais e hiperespectrais, e com espectroscopias do infravermelho próximo e da região do visível. Essas técnicas se baseiam no estudo da propagação da luz dentro da carne, a qual é fortemente modulada pela absorção ótica e pelas propriedades de espalhamento (*scattering*).

Desse modo, há um maior interesse em medidas de espalhamento ótico na caracterização da qualidade da carne, sendo dada maior atenção às estimativas da capacidade de retenção de água, da maciez e da cor da carne.

Na área de qualidade de carnes, pesquisa anterior (AMARAL et al., 2013) demonstrou que uma técnica ótica conhecida como *Biospeckle laser* pode fornecer informações relevantes sobre características físico-químicas responsáveis pela cor e pela maciez da carne bovina durante o processo de maturação. O *Biospeckle laser* ou *Speckle laser dinâmico* é um método ótico que avalia, ao longo do tempo, o padrão de interferência formado quando um material biológico é iluminado por uma luz coerente, como um *laser*. Isto permite monitorar a variação temporal no padrão do *speckle*, a qual pode ser relacionada com a atividade biológica associada a diversos fenômenos físico-químicos da amostra que causam a mudança de posição dos dispersores de luz. Por isso, a utilização do *Biospeckle laser* na área biológica tem sido uma linha de pesquisa de grande potencial. Contudo, isso tem ocorrido em condições controladas de um laboratório de ótica com filtragem de resíduo, isolamento mecânico de áreas externas e de trabalho, além de ausência de iluminação.

Portanto, o objetivo desse estudo foi avaliar o uso de uma configuração experimental adaptada às condições industriais do *Biospeckle laser* na predição da qualidade da carne bovina durante o processo de maturação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No mercado mundial, o Brasil é o segundo maior produtor, atrás apenas dos Estados Unidos, e o maior exportador, com mais de 20% de *market share*, de carne bovina em quantidade (peso de equivalente carcaça). No entanto, o valor pago pela carne bovina brasileira ainda é inferior àquele pago a outros países produtores e exportadores. Isso ocorre porque há uma grande diversidade de sistemas de criação no Brasil, o que proporciona uma maior variabilidade dos atributos de qualidade da carne bovina brasileira (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2014). Atualmente, apenas a garantia de um alimento seguro já não é suficiente para atender às expectativas dos consumidores mais exigentes, os quais estão dispostos a pagar mais caro por garantia de qualidade, principalmente, quanto à cor, suculência e maciez da carne bovina (BOLEMAN et al., 1997; FELDKAMP; SCHROEDER; LUSK, 2005; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LUSK; FOX, 2001; LYFORD et al., 2010; MILLER et al., 2001; POLKINGHORNE; THOMPSON, 2010; SHACKELFORD et al., 2001; TROY; KERRY, 2010).

2.1 Qualidade da carne bovina

Para que os consumidores desejem comprar e consumir um determinado alimento, suas percepções a respeito dele devem ser positivas. As percepções de qualidade, *i.e.*, estímulos de informação que são considerados e que podem ser verificados pelo consumidor antes do consumo, contribuem para a construção da opinião e, logo, para a opção de compra (TROY; KERRY, 2010). As percepções de qualidade extrínseca são aquelas que não fazem fisicamente parte do alimento, tais como o preço, a apresentação, a origem e a marca. Entre as percepções de qualidade intrínseca, *i.e.*, aquelas que fazem fisicamente parte do

alimento, como a cor, a maciez e o marmoreio da carne bovina são as mais importantes (ACEBRÓN; DOPICO, 2000; GRUNERT; BREDAHL; BRUNSØ, 2004). Desse modo, como nem todos os atributos de qualidade podem ser avaliados pelo consumidor no ponto de venda, ele decide comprar uma carne bovina *in natura* com base em várias percepções (preço, rótulo, selos de certificação, marca, aparência e tipo de corte), as quais, por sua vez, inferem sobre os atributos de qualidade (maciez, sabor, frescor e valor nutricional) (GRUNERT, 1997; TROY; KERRY, 2010).

A cor da carne bovina *in natura* é o primeiro atributo de qualidade percebido pelo consumidor no ato de compra, sendo utilizada como um sinal, nem sempre correto, de frescor, salubridade, conservação e da qualidade durante o consumo. Desse modo, a apresentação de carnes bovinas *in natura* com cor vermelho brilhante no ponto de venda é de extrema importância, pois os consumidores avaliam negativamente a carne que não atende a esta expectativa (CARPENTER; CORNFORTH; WHITTIER, 2001; TROY; KERRY, 2010). Por isso, a carne com coloração inadequada só consegue ser vendida com desconto ou moída, sendo estimado que, por esse motivo, 15% das vendas a varejo nos Estados Unidos ocorreram com desconto, o que foi responsável por uma perda de receita anual de um bilhão de dólares. (TROY; KERRY, 2010).

No entanto, a cor da carne bovina *in natura* não é bem correlacionada com os atributos associados à qualidade durante o consumo. A preferência do consumidor por determinada cor de carne bovina *in natura* é suficiente para influenciar a sua probabilidade de compra, porém não afeta a aceitação do seu sabor. É provável que, como a decisão de compra da carne é realizada no mercado, a satisfação do consumidor durante o seu consumo em casa dependa apenas dos atributos maciez, suculência e sabor (CARPENTER; CORNFORTH; WHITTIER, 2001; TROY; KERRY, 2010). Pesquisas sobre a qualidade da carne durante o consumo em carnes demonstram que a maciez, a suculência, o

sabor e a palatabilidade global são os atributos de qualidade mais procurados pelos consumidores, e a maciez é considerada o mais importante. Por isso, há muito tempo os consumidores estão dispostos a pagar mais por uma carne bovina com garantia de maciez (BOLEMAN et al., 1997; FELDKAMP; SCHROEDER; LUSK, 2005; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LUSK; FOX, 2001; LYFORD et al., 2010; MILLER et al., 2001; POLKINGHORNE; THOMPSON, 2010; SHACKELFORD et al., 2001; TROY; KERRY, 2010).

A maioria dos programas de carnes bovinas com selos “especiais” das marcas comerciais tenta garantir a sua qualidade durante o consumo controlando alguns dos fatores que afetam a maciez, principalmente, raça, sexo, idade e dieta. No entanto, apesar de a qualidade dessas carnes bovinas com selos “especiais” serem, em média, superiores às demais, a sua variação ainda é elevada, o que pode propiciar a comercialização de uma carne bovina fora do padrão de qualidade esperado pelos consumidores. Isso pode causar prejuízos irreparáveis à imagem dos selos “especiais” das marcas comerciais (POLKINGHORNE; THOMPSON, 2010; TROY; KERRY, 2010). Desse modo, um método que conseguisse avaliar individualmente a qualidade da carne bovina evitaria isso, proporcionando uma melhor estratificação das carcaças por qualidade e aumentando os ganhos econômicos da cadeia produtiva.

2.1.1 Cor

A cor da carne bovina *in natura* é um dos principais componentes que contribuem para a sua aparência, sendo considerada como o principal atributo de qualidade percebido pelo consumidor durante o ato de compra. A cor da carne bovina *in natura* depende, principalmente, da concentração e da forma química dos pigmentos mioglobina e das características físicas da carne, tais como as

propriedades de dispersão e absorção da luz (HUGHES et al., 2014; MANCINI; HUNT, 2005; MANCINI; RAMANATHAN, 2014; TROY; KERRY, 2010).

A concentração de mioglobina nos músculos varia entre e dentro das espécies e é afetada por fatores genéticos e ambientais (KING et al., 2010; KING et al., 2011; MANCINI; HUNT, 2005). A mioglobina pode ocorrer em uma das três formas químicas: deoximioglobina, oximioglobina ou metamioglobina. A interconversão entre essas três formas químicas do pigmento é possível e a forma dominante depende das condições da carne e do meio (FAUSTMAN; CASSEN, 1990; MANCINI; HUNT, 2005; TROY; KERRY, 2010).

A deoximioglobina (Mb^+) contém ferro no estado ferroso (Fe^{+2}) e é caracterizada pela ausência de ligante na sexta posição do grupo heme. A Mb^+ possui coloração vermelho púrpura e é responsável pela cor da carne logo após o corte ou armazenada a vácuo. A oximioglobina (O_2Mb) possui coloração vermelho brilhante e é formada após a exposição da Mb^+ ao oxigênio atmosférico (*blooming*), pois este se liga à sexta posição do Fe^{+2} . A formação da O_2Mb a partir da oxigenação da Mb^+ determina a intensidade da cor vermelha inicial, após a oxigenação. Desse modo, a O_2Mb é a responsável pela cor da carne bovina *in natura*, considerada ideal e preferida pelos consumidores. As formas químicas Mb^+ e O_2Mb podem se transformar em metamioglobina (MMb) pela oxidação do ferro no estado ferroso (Fe^{+2}) nativo ao estado férrico (Fe^{+3}), o que impossibilita a sua ligação com o oxigênio, proporcionando uma coloração amarronzada à carne fresca, que não é bem aceita pelos consumidores (FAUSTMAN; CASSEN, 1990; MANCINI; HUNT, 2005; TROY; KERRY, 2010).

A intensidade e a estabilidade da cor da carne bovina *in natura* são influenciadas, principalmente, pela taxa de consumo de oxigênio (TCO) e pela atividade da metamioglobina redutase (MRA) (BEKHIT; FAUSTMAN, 2005;

MANCINI; HUNT, 2005; MANCINI; RAMANATHAN, 2014; MCKENNA et al., 2005). O consumo de oxigênio diminui o desenvolvimento da cor vermelha inicial e a sua intensidade, pois diminui a oxigenação da mioglobina, mantendo-a como Mb⁺, cuja coloração é vermelho púrpura. A TCO está associada com a respiração residual da mitocôndria durante o período *post mortem* e relaciona-se à profundidade de penetração do oxigênio através da superfície exposta do músculo (MANCINI; HUNT, 2005; MANCINI; RAMANATHAN, 2014; MCKENNA et al., 2005). A metamioglobina redutase reduz o Fe⁺³ a Fe⁺², transformando a MMb em Mb⁺, possibilitando a sua oxigenação à O₂Mb. Desse modo, a MRA prolonga a estabilidade da coloração vermelho cereja brilhante da carne bovina *in natura* (BEKHIT; FAUSTMAN, 2005; MCKENNA et al., 2005; SEYFERT et al., 2006).

Vários fatores influenciam a TCO e a MRA, contribuindo para a descoloração da carne durante o armazenamento. A taxa de acúmulo de MMb está relacionada com fatores intrínsecos, tais como o pH, o tipo de fibra muscular, a idade, a raça, o sexo e a dieta dos animais, e com fatores extrínsecos, tais como o manejo pré-abate, a estimulação elétrica e a refrigeração das carcaças. Além disso, no ponto de venda, a temperatura, o tipo de iluminação, o desenvolvimento microbiológico, e a atmosfera e disponibilidade (pressão parcial) de oxigênio na embalagem podem influenciar a cor e, logo, a venda da carne bovina *in natura* (MANCINI; HUNT, 2005; MCKENNA et al., 2005; TROY; KERRY, 2010).

Em relação às características físicas da carne, a luz que entra em contato com a superfície da carne bovina pode ser refletida, absorvida ou espalhada e a combinação desses três fenômenos determina a sua cor. Contudo, é a luz refletida de volta aos olhos que determina a percepção do consumidor e, logo, a sua aceitação. Desse modo, a luz refletida pela carne é, frequentemente, comparada com a avaliação instrumental por meio das coordenadas de cor. Os

índices de vermelho (a^*) e de amarelo (b^*) tendem a ser associados ao pigmento mioglobina, enquanto a luminosidade (L^*) está relacionada com as características estruturais do músculo, os quais juntos determinam a luz refletida que é vista pelo consumidor (HUGHES et al., 2014; MANCINI; HUNT, 2005; RAMOS; GOMIDE, 2007).

A dispersão de luz é o processo no qual a luz é espalhada ou desviada por colisões com partículas do músculo, que podem ser o tecido conjuntivo (adiposo e conectivo), estruturas das fibras musculares ou qualquer líquido no interior ou em torno dessas estruturas. Quanto mais luz for dispersa no interior da microestrutura muscular, menos luz será transmitida para dentro do músculo e mais luz poderá ser refletida. A extensão da dispersão da luz pode ser afetada pelos atributos estruturais do músculo e, logo, contribuir para a luminosidade percebida como vista pelos olhos. Alguns elementos estruturais que podem afetar as propriedades de espalhamento de luz do músculo são o tamanho das fibras musculares e das miofibrilas, e o índice de refração do meio (lúmen do feixe de fibras musculares e do sarcoplasma) (HUGHES et al., 2014; RAMOS; GOMIDE, 2007).

Portanto, a cor observada na superfície da carne é resultado da absorção seletiva da luz pela mioglobina e por outros componentes tais como as fibras musculares e suas proteínas, sendo também influenciada pela quantidade de água no espaço extracelular. Quanto menor o nível de dispersão da luz incidente, mais escura será a carne. Isso acontece porque a absorção da luz incidente depende do seu grau de penetração nas fibras musculares, e quanto maior o grau de penetração, maior será a absorção de luz pelos pigmentos. O grau de dispersão da luz está associado à condição estrutural das proteínas miofibrilares e sarcoplasmáticas, ao poder de reflexão da superfície e à diferença entre os índices de refração do sarcoplasma e das miofibrilas. Geralmente, quanto menor o teor de proteínas sarcoplasmáticas precipitadas sobre a superfície das

miofibrilas, menor será a dispersão da luz, originando carnes mais escuras. Além disso, a menor deposição de água exsudada na superfície das fibras musculares e a menor diferença entre os índices de refração do sarcoplasma e das miofibrilas, causados pelo menor encurtamento das fibras musculares em função do menor abaixamento do pH, contribuem para a redução da dispersão da luz, gerando carnes mais escuras (HUGHES et al., 2014; MANCINI; HUNT, 2005; RAMOS; GOMIDE, 2007;), como ocorre em carnes DFD (*dark, firm e dry* - escuras, firmes e secas).

2.1.2 Capacidade de Retenção de Água (CRA)

A perda de água da carne bovina *in natura* é importante para a indústria em razão de sua implicação econômica. Menor retenção de água pode causar maiores perdas de peso e de rendimento em carcaças, cortes e produtos cárneos (AASLYNG, 2002; HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; RAMOS; GOMIDE, 2007). Além disso, maior exsudação pode causar perdas em aparência, textura, valor nutricional e atratividade, prejudicando a qualidade da carne bovina *in natura* e também o seu processamento (HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; PEARCE et al., 2011; TORNBERG, 2005).

A estrutura muscular é composta por proteínas insolúveis (miofibrilares e citoesqueléticas e tecido conjuntivo), proteínas solúveis (sarcoplasmáticas, incluindo a mioglobina e as enzimas) e água. Essa água, além de permitir a difusão e a interação de substratos e enzimas, determina a plasticidade, a rigidez e a gelatinização das proteínas insolúveis. Desse modo, a retenção de água na carne é importante não apenas para a sua aceitação e por razões econômicas, mas também por causa de seu papel na modelagem da estrutura muscular e nos consequentes efeitos sobre a qualidade, principalmente cor e maciez, da carne

(HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; PEARCE et al., 2011; TORNBERG, 2005).

A capacidade de retenção de água (CRA) é definida como a habilidade da carne *in natura* em manter sua própria água mediante a aplicação de forças externas, como as decorrentes do corte, da moagem, da prensagem e do aquecimento, *i.e.*, operações que ocorrem durante o processamento, o armazenamento, o transporte e o cozimento da carne. A água liberada pode ser descrita como perdas por gotejamento, por purga, por exsudação ou por cocção (HUGHES et al., 2014; PEARCE et al., 2011). Genética, nutrição, estresse pré-abate, abate e processamento pós-abate (resfriamento e maturação) são associados a variações nesses atributos de retenção de água (HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; RAMOS; GOMIDE, 2007; WARNER et al., 2010).

O músculo é composto por cerca de 75% de água. Considerando que 85% dessa água se localizam entre as miofibrilas, ligadas às (cargas das) proteínas, imobilizadas (por ligações de hidrogênio) ou livres (sustentadas por forças capilares), a desnaturação das proteínas miofibrilares, as alterações no espaçamento da rede miofibrilar e o encurtamento do sarcômero proporcionam uma redução da CRA do músculo, aumentando as perdas de água da carne. A desnaturação proteica, o espaço entre os miofilamentos e o comprimento do sarcômero são dependentes de: tipo de músculo, reserva de glicogênio, pH, temperatura e nível de glicólise no músculo no início do *rigor mortis*. A taxa e a extensão de queda do pH muscular são influenciados por eventos bioquímicos *ante e post mortem* que atuam em componentes estruturais das fibras musculares e dos tecidos conjuntivos associados (HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; PEARCE et al., 2011; TORNBERG, 2005).

Durante a conversão do músculo em carne, o sarcômero encolhe longitudinalmente e lateralmente em razão de dois processos simultâneos dentro

da estrutura miofibrilar: o desenvolvimento do *rigor mortis*, *i.e.*, a associação irreversível de filamentos grossos e finos após a depleção do ATP, causando o encurtamento do sarcômero, que é transmitido para as miofibrilas; a redução do pH que causa alterações na estrutura das proteínas miofibrilares, principalmente miosina e actina. O pH diminui de 7,0 no músculo para, em média, 5,6 na carne em razão da formação de ácido láctico na glicólise, reduzindo a repulsão eletrostática entre as proteínas miofibrilares e, logo, entre os miofilamentos, o que contribui para o encolhimento lateral das miofibrilas. Se o pH diminui rapidamente enquanto a temperatura muscular ainda está alta, as miosinas desnaturaram, o que contribui para o encolhimento miofibrilar lateral e reduz a capacidade da miosina em se ligar à água, resultando em uma menor CRA. O encolhimento longitudinal e lateral das miofibrilas é transmitido a toda a célula e, desse modo, reduz o volume da fibra muscular (HONIKEL, 2004; HONIKEL et al., 1986; HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; OFFER, 1991; OFFER et al., 1989; PEARCE et al., 2011).

Essas alterações *post mortem* no espaçamento da rede miofibrilar geram a força motriz para as perdas por gotejamento. A água é expulsa da estrutura miofibrilar pelo encolhimento longitudinal e lateral da miofibrila e passa para o espaço extra-miofibrilar, porém ainda intracelular. Em seguida, a água passa pela membrana sarcoplasmática, que se torna mais permeável pós-rigor, e acumula no espaço extracelular. As separações de feixes e de fibras musculares de, respectivamente, perímísio e endomísio formam os canais de gotejamento, preferencialmente ao longo da direção das fibras musculares, que conduzem a água do meio extracelular para a superfície da carne, gerando a exsudação (BERTRAM et al., 2004; COUSINS, 1992; HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; OFFER, 1991; OFFER et al., 1989; OFFER; TRINICK, 1983).

A carne também pode perder uma grande quantidade de água durante a cocção, dependendo do método de cozimento, da temperatura e do tempo empregados, pois há um aumento na rigidez da estrutura miofibrilar com o cozimento em razão da desnaturação das proteínas. Entre 40 a 60 °C, um encolhimento transversal ocorre nas miofibrilas e, se o citoesqueleto estiver intacto, nas fibras musculares como um todo. Esse encolhimento na estrutura miofibrilar é, geralmente, atribuído à desnaturação da miosina que ocorre nesta faixa de temperatura, embora a desmina também possa estar envolvida. A 65 °C, um encolhimento cooperativo pode ocorrer entre o colágeno e as fibras musculares, embora existam evidências que indicam que o colágeno não atua na formação da perda por cocção. A 70 e 80 °C, o encolhimento na estrutura miofibrilar é, geralmente, atribuído à desnaturação da actina e, também, da titina (HUGHES et al., 2014; KONDJAYAN et al., 2013; KONDJAYAN et al., 2014; TORNBERG, 2005).

As estruturas do músculo que influenciam a CRA e, logo, a perda de água são bem conhecidas e estudadas em carne crua. No entanto, as estruturas e os mecanismos que influenciam a perda de água durante o cozimento são menos estudados e diferentes daqueles em carne crua (HUGHES et al., 2014). Muitas vezes há uma fraca correlação entre a CRA da carne crua, a perda de água durante a cocção e a suculência da carne cozida. Contudo, em estudos em que existe uma ampla variedade em termos de qualidade, como observado em carne suína, a correlação entre a CRA da carne crua e a perda por cocção pode ser alta, porém depende da temperatura de cozimento. A 80 °C, apenas 20% da variação da perda por cocção é explicada pela perda por gotejamento da carne crua, enquanto que a 60 ou 70 °C, 55 a 58% da variação da perda por cocção é explicada pela perda por gotejamento da carne crua (AASLYNG et al., 2003; HUGHES et al., 2014; TORNBERG, 2005).

2.1.3 Maciez

Pesquisas relatam constantemente que a maciez da carne bovina é considerada o atributo de qualidade percebido durante o consumo mais importante, procurado e associado à satisfação e a uma futura compra pelos consumidores. Além disso, os consumidores estão dispostos a pagar mais por uma carne bovina *in natura* que tenha garantia de maciez (BOLEMAN et al., 1997; FELDKAMP; SCHROEDER; LUSK, 2005; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LUSK; FOX, 2001; LYFORD et al., 2010; MILLER et al., 2001; POLKINGHORNE; THOMPSON, 2010; SHACKELFORD et al., 2001; TROY; KERRY, 2010). No entanto, a maciez é um atributo de qualidade altamente variável, dependendo de muitos fatores intrínsecos e extrínsecos ao animal e de suas interações. Essa grande variabilidade limita a aceitabilidade da carne bovina *in natura*, pois é uma razão para a insatisfação do consumidor e, logo, para a redução do seu consumo (KOOHMARAIE, 1996; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; POLKINGHORNE; THOMPSON, 2010; TROY; KERRY, 2010).

A maciez da carne bovina é determinada pela quantidade e estabilidade (solubilidade) do tecido conectivo, pelo encurtamento do sarcômero durante o desenvolvimento do *rigor mortis* e pela proteólise *post mortem* das proteínas miofibrilares e citoesqueléticas (CHRIKI et al., 2012; GEESINK, 2006; GIRARD et al., 2012; KOOHMARAIE; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010). Chriki et al. (2012) aplicaram análises de *cluster*, de correlação e de componentes principais em 4.366 observações de 40 experimentos e demonstraram que o aumento da maciez da carne bovina *in natura* avaliada por julgadores treinados está relacionado com menor força de cisalhamento, menores teores de colágeno insolúvel e total, menor área transversal das fibras

musculares e com uma composição global exibindo mais fibras oxidativas que fibras glicolíticas.

A maciez da carne é reduzida quando há grande quantidade e estabilidade do tecido conectivo no músculo. As ligações cruzadas do colágeno se tornam mais estruturadas e numerosas em razão de maior atividade física e com o avanço da idade do animal (CHRIKI et al., 2012; GIRARD et al., 2012; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006).

O componente miofibrilar inclui variações em razão do tamanho e da composição dos tipos das fibras musculares. Músculos que possuem fibras musculares com maiores áreas da seção transversal apresentam carnes mais duras que aqueles que possuem fibras musculares com menores áreas transversais (CHRIKI et al., 2012; LEE; JOO; RYU, 2010; LEFAUCHEUR, 2010). A relação das proteínas miofibrilares com a maciez da carne bovina é, basicamente, o resultado do encurtamento do sarcômero, da perda da CRA e do nível de proteólise *post mortem* (GIRARD et al., 2012; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010). A maciez e a CRA, geralmente, são correlacionadas, visto que perdas na CRA tornam a carne mais dura em razão da redução da quantidade de água intramuscular, com consequente aumento de resistência das fibras musculares, como ocorre em *jerked beef*, charque e carne seca (CHRIKI et al., 2012; GIRARD et al., 2012; HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LEFAUCHEUR, 2010).

O estado contrátil das proteínas miofibrilares é um dos principais fatores que afetam a maciez inicial da carne, sendo, sobretudo, uma função da taxa e da severidade do desenvolvimento do *rigor mortis* (KOOHMARAIE et al., 2002; RHEE et al., 2004; WHEELER; KOOHMARAIE, 1999). Além disso, o comprimento do sarcômero dos músculos também depende do tipo de pendura (suspensão da carcaça), sendo que os dois métodos mais usados são pelo tendão

de Aquiles e pelo forâmen pélvico. A dureza da carne aumenta quando o comprimento do sarcômero atinge valores inferiores a 2,0 μm (BOUTON et al., 1973; SMULDERS et al., 1990; WHEELER; SHACKELFORD; KOOHMARAIE, 2000). Bouton et al. (1973) relataram que a dureza miofibrilar, avaliada pela força de cisalhamento, independe do comprimento de sarcômero para valores maiores a 1,8 μm , porém alta correlação é observada quando são consideradas apenas amostras com sarcômeros menores que 2,0 μm . Smulders et al. (1990) observaram que a relação entre a maciez avaliada sensorialmente e o comprimento do sarcômero pode ser expressa por uma curva sigmoideal com ponto de inflexão em 1,8 μm , a partir do qual maiores valores estão associados à maciez da carne.

Segundo Lee, Joo e Ryu (2010) e Lefaucheur (2010), alguns estudos têm demonstrado que as diferenças nas características de qualidade da carne podem ser atribuídas ao metabolismo energético do músculo e não à composição entre os tipos de fibras musculares. A taxa e a extensão de queda do pH muscular podem influenciar a maciez da carne, afetando a natureza de ligação da água com as proteínas e, portanto, a estrutura física e a CRA da carne. O pH também afeta a maciez da carne por meio do seu efeito sobre a atividade das enzimas proteolíticas (calpaínas e catepsinas) que estão relacionadas com a conversão do músculo em carne e com o processo de maturação (GEESINK, 2006; HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; KOOHMARAIE; LEE; JOO; LEFAUCHEUR, 2010; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; RYU, 2010).

As carnes maturadas são, normalmente, mais macias. Diversas pesquisas demonstraram que o sistema proteolítico calpaína possui um papel central na proteólise *post mortem* e, logo, no amaciamento da carne. A maioria da proteólise *post mortem* e do desenvolvimento da maciez durante a maturação da carne bovina é considerada como resultado da ativação da μ -calpaína, pois as

concentrações de cálcio *post mortem* geralmente não alcançam o necessário para ativar a m-calpaína sem que cálcio seja adicionado à carne (CRUZEN et al., 2014; GEESINK et al., 2006; GOLL et al., 2003; KOOHMARAIE, 1992; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010). Além disso, o padrão proteolítico observado quando se adiciona μ -calpaína diretamente a miofibrilas é semelhante ao observado na carne bovina maturada (KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010). Contudo, as calpaínas ativadas pelo cálcio, além de degradarem os substratos, também autolisam, implicando perda de sua atividade (KOOHMARAIE; GEESINK, 2006).

O inibidor endógeno da μ -calpaína e da m-calpaína é a calpastatina. Cada molécula de calpastatina pode inibir até quatro moléculas de calpaína. A atividade inibitória da calpastatina também proporcionou evidências que comprovam o papel da μ -calpaína na proteólise *post mortem*. Maior atividade de calpastatina tem sido associada com menor maciez em carne bovina *in natura* (CRUZEN et al., 2014; GEESINK et al., 2006; GOLL et al., 2003; KEMP et al., 2010; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010).

2.2 Maturação

A maturação consiste em armazenar a carne bovina *in natura* pós-rigor, embalada a vácuo, sob temperaturas de refrigeração (em torno de 1 °C) por 14 a 21 dias com o objetivo de que alterações naturais favoreçam a maciez e a palatabilidade global (BREWER; NOVAKOFSKI, 2008; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006). No entanto, o tempo extra e os requerimentos de espaço e de temperatura controlada adicionam consideráveis custos de produção, sem que todas as carnes alcancem o mesmo nível de maciez (força de cisalhamento). Isso

ocorre, pois há uma grande variação na taxa e na extensão do amaciamento, o que contribui para a inconsistência da maciez da carne bovina percebida pelos consumidores (GEESINK et al., 2006; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; KEMP et al., 2010; KING et al., 2010).

Na maturação, a ação prolongada de enzimas proteolíticas endógenas é a principal responsável pelas mudanças na estrutura do tecido muscular e, portanto, na maciez da carne. Durante o amaciamento, ocorre a degradação das principais estruturas (enfraquecimento de miofibrilas, fragmentação, enfraquecimento e degradação da linha Z e da banda I) e proteínas miofibrilares e citoesqueléticas (troponinas T e I, titina, desmina, distrofina, nebulina e vinculina) (GEESINK et al., 2006; GOLL et al., 2003; KEMP et al., 2010; KOOHMARAIE, 1994; KOOHMARAIE, 1996; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; NOWAK, 2011).

O sistema proteolítico calpaína é o mais estudado e aceito como o que mais contribui para o amaciamento de carnes. Seus principais constituintes são duas enzimas dependentes de cálcio, a μ -calpaína e a m-calpaína, e um inibidor específico, a calpastatina (GOLL et al., 2003; KEMP et al., 2010; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; NOWAK, 2011). Em razão de sua maior atividade, a μ -calpaína é considerada a enzima responsável pela maioria da proteólise *post mortem* e, logo, do amaciamento alcançado pela maturação da carne. Isto é evidenciado pela concentração de cálcio 6 horas *post mortem* atingir níveis superiores (100 μ M) ao necessário para ativar a μ -calpaína (3 a 50 μ M), mas não pra ativar a m-calpaína (1 mM), e pela semelhança entre os padrões proteolíticos de miofibrilas degradadas pela ação da μ -calpaína e da carne maturada (GEESINK et al., 2006; GOLL et al., 2003; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010).

No entanto, estudos genéticos verificaram que a calpastatina, por meio de seu efeito inibitório sobre a μ -calpaína, é responsável por cerca de 40 a 45%

da variação da maciez da carne bovina. Contudo, a genética é responsável por metade da maciez da carne bovina, enquanto a outra metade é consequência dos fatores ambientais, tais como a dieta, o estresse e as condições de abate. A atividade de calpastatina *post mortem* é, geralmente, maior em músculos de animais *Bos indicus* que naqueles de animais *Bos taurus*, o que resulta na necessidade de maiores tempos de maturação para obter níveis semelhantes de maciez (KEMP et al., 2010; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; SHACKELFORD et al., 1994; WHIPPLE et al., 1990).

A maturação também afeta a cor inicial e a estabilidade da cor da carne bovina (BOAKYE; MITTAL, 1996; KING et al., 2012). Alterações na atividade mitocondrial em razão da maturação podem influenciar a intensidade e a estabilidade da sua cor. O consumo de oxigênio diminui com o tempo de maturação, o que aumenta a intensidade inicial da cor e os valores de a^* das carnes maturadas devido a menor competição por oxigênio da mioglobina com a mitocôndria. Isto resulta em uma maior profundidade de penetração do oxigênio, aumentando a oxigenação da mioglobina e a espessura de O_2Mb sob a superfície da carne. Além disso, a capacidade das mitocôndrias em converter O_2Mb em Mb^+ também é reduzida com tempo de maturação (KING et al., 2012; MANCINI; HUNT, 2005; MANCINI; RAMANATHAN, 2014).

Entretanto, esta melhoria no desenvolvimento da cor inicial é perdida em razão de sua menor estabilidade em carnes maturadas. Isto é causado pelos efeitos negativos do tempo de maturação sobre a redução da MMb mediada pelas mitocôndrias (MANCINI; RAMANATHAN, 2014). Ainda, por causa da maturação, a carne tende a se tornar mais clara, pois as alterações na estrutura e nos índices de refração proporcionam uma maior dispersão (*scattering*) e reflexão da luz (HUGHES et al., 2014).

Com a maturação, também pode ocorrer um aumento da CRA e uma menor perda por gotejamento, pois parece que as fibras musculares “incham”.

As miofibrilas são ligadas entre si e à membrana celular pelas proteínas citoesqueléticas. Essas ligações, quando intactas, transferem a força de contração da miofibrila para o encolhimento de toda fibra muscular, expulsando assim a água para o espaço extracelular. Por outro lado, quando essas ligações não estão intactas, o encolhimento das miofibrilas não é transferido para toda a fibra muscular e há menor formação de grandes canais de gotejamento, o que faz com que a água possa permanecer dentro da fibra muscular (HUGHES et al., 2014; PEARCE et al., 2011; STRAADT et al., 2007).

Apesar desse aumento da CRA associada com o “inchaço” das fibras musculares durante a maturação, após o cozimento a carne maturada apresenta pronunciado encolhimento das fibras musculares e maior perda por cocção (BOAKYE; MITTAL, 1993; HUGHES et al., 2014; STRAADT et al., 2007). A perda de água durante o cozimento é, geralmente, maior em carnes maturadas que naquelas não maturadas, porém isto depende do tempo de maturação e das temperaturas pré-rigor (BERTRAM et al., 2004; KIM; WARNER; ROSENVOLD, 2014; SHANKS; WULF; MADDOCK, 2002; STRAADT et al., 2007; WARNER et al., 2014). Isso ocorre porque, além do rompimento e aumento da permeabilidade do sarcolema, a estrutura proteica das carnes maturadas, enfraquecida pela degradação das proteínas miofibrilares e citoesqueléticas, possivelmente não consegue reter a água durante o cozimento (HUGHES et al., 2014; WU et al., 2006).

2.3 Raça

O Brasil possui o segundo maior rebanho bovino, atrás apenas da Índia, com mais de 20% do total, o que representa o maior rebanho comercial no mundo (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2014). Segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne

(ABIEC), cerca de 80% do rebanho brasileiro são compostos por raças zebuínas (*Bos indicus*), sendo estimado que 90% destes pertencem à raça Nelore. As raças zebuínas são caracterizadas pela sua rusticidade, resistência a doenças e alta adaptabilidade às diversas condições de criação brasileiras e, por isso, são encontradas em todas as regiões do país. No entanto, na região Sul, em razão de menores temperaturas e pastagens com maior valor nutricional, há a crescente criação de raças taurinas (*Bos taurus*), de origem europeia, com destaque para a raça *Aberdeen Angus* (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORES DE CARNE, 2014).

A associação entre os atributos de qualidade de carne e as características musculares varia com a raça (CHRIKI et al., 2012; GIRARD et al., 2012; KING et al., 2010; NOWAK, 2011; TROY; KERRY, 2010). A raça pode influenciar fatores que contribuem para a cor (concentração e forma química da mioglobina) e sua estabilidade (descoloração e taxa de acúmulo de MMb) na carne bovina *in natura* durante o armazenamento. Raças com cor de carne mais estável, geralmente, possuem menor concentração de mioglobina em comparação a outras raças (KING et al., 2010; TROY; KERRY, 2010).

Durante a conversão do músculo em carne e o processo de maturação, a quantidade, a localização e a mobilidade da água na carne mudam em razão de alterações estruturais que afetam a CRA. Isto depende de diversos fatores *ante* (raça, músculo, nível de estresse e tipo, etc.) e *post mortem* (abate, resfriamento, maturação) (PEARCE et al., 2011).

A grande variabilidade de maciez na carne bovina também pode ser relacionada a diferenças entre as raças. Isso ocorre, pois, entre outras características, a quantidade e a estabilidade (solubilidade) do tecido conectivo, o tamanho e a composição dos tipos de fibras musculares, o estado contráctil do músculo, o teor de gordura intramuscular, e atividade metabólica e enzimática, principalmente a quantidade e a atividade de calpaínas e de calpastatinas,

dependem das raças avaliadas (CHAMBAZ et al., 2003; GIRARD et al., 2012; KING et al., 2010; NOWAK, 2011; TROY; KERRY, 2010).

A carne bovina de animais *Bos taurus*, geralmente, possui maior maciez que a carne de animais *Bos indicus* (BRESSAN et al., 2011; JOHNSON et al., 1990; SHACKELFORD et al., 1991; WHEELER et al., 1990; WHIPPLE et al., 1990). Várias pesquisas demonstraram que à medida que a proporção de *Bos indicus* aumenta no cruzamento, ocorre uma redução na maciez da carne bovina ao mesmo tempo em que há um aumento em sua variabilidade (CROUSE et al., 1989; GURSANSKY et al., 2010; MARSHALL, 1994; RESTLE et al., 1999; WHIPPLE et al., 1990). A menor maciez em carnes de animais *Bos indicus* é atribuída, principalmente, a sua maior atividade de calpastatina (KOOHMARAIE, 1994; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; SHACKELFORD et al., 1991; SHACKELFORD et al., 1994; WHIPPLE et al., 1990). Por isso, a extensão da proteólise induzida pela μ -calpaína difere entre as carnes de animais *Bos indicus* e *Bos taurus*.

Em estudo com os mesmos animais avaliados no presente experimento, Duarte et al. (2013) observaram maior atividade de calpastatina no músculo *Longissimus* de bovinos da raça Nelore, o que proporcionou uma carne com menor proteólise (menor IFM) e menor maciez (maior força de cisalhamento), em comparação à raça Angus. Martins (2015) confirmou que, após a maturação, as menores proteólises e maciez da carne de Nelore em relação à carne de Angus se devem à maior atividade de calpastatina, pois não foram observadas diferenças entre as raças quanto aos níveis de expressão gênica e às quantidades de calpastatina.

2.4 Técnicas emergentes de avaliação da qualidade

A avaliação da qualidade da carne bovina é realizada por diversos métodos. Em alguns frigoríficos, a cor e o marmoreio de uma área do contrafilé são comparados com padrões de referência. Essa inspeção visual é subjetiva, demorada e inconsistente. Por outro lado, a maioria dos métodos analíticos (pHmetro, perdas por gotejamento e cocção, CRA, colorímetro, texturômetro, sensoriais, etc.) apresenta execução complexa e demorada, custo elevado e, ou é destrutiva. Desse modo, esses métodos não são adequados para uma rápida detecção dos atributos de qualidade no frigorífico. Portanto, uma técnica que possa prever eficientemente a qualidade da carne bovina, ainda no frigorífico, é altamente desejável pela indústria da carne para proporcionar o melhor mercado para as carcaças bovinas e aumentar os ganhos econômicos de sua cadeia produtiva (AMARAL et al., 2013; PRIETO et al., 2009; RANASINGHESAGARA et al., 2010; XIONG et al., 2014).

Atualmente, diversas tecnologias têm sido propostas como alternativas a esses métodos convencionais. Entre as tecnologias emergentes em estudo, os métodos ópticos têm o maior potencial de aplicação *online* por serem rápidos, não destrutivos e, geralmente, de baixo custo (AMARAL et al., 2013; PRIETO et al., 2009; RANASINGHESAGARA et al., 2010). Pesquisas têm sido realizadas, principalmente, com imagens de vídeo, computacionais e hiperespectrais, espectroscopias do infravermelho próximo e da região visível, e sondas de reflectância. Essas técnicas se baseiam no estudo da propagação da luz dentro da carne, a qual é fortemente modulada pela absorção ótica e pelas propriedades de espalhamento (*scattering*) (RABAL; BRAGA, 2010; XIA et al., 2007; XIONG et al., 2014). Há um grande interesse em medidas de espalhamento óptico na caracterização da qualidade da carne, sendo dada maior atenção à estimativa de CRA, cor e maciez da carne bovina (Tabela 1).

Tabela 1 Aplicações de técnicas emergentes na predição de indicadores de qualidade da carne bovina

Atributo de Qualidade	Técnica	Modo	Espectro (nm)	Análise dos Dados	Acurácia (R ²)	Referência
SSF	HI	Reflectância	400 - 1000	ACD	~ 96% de acerto (macia, média ou dura)	Naganathan et al. (2008)
WBSF	HI	<i>Scattering</i>	496 - 1036	RMS	0,67	Cluff et al. (2008)
<i>L*</i>					0,85	
<i>a*</i>	HI	<i>Scattering</i>	400 - 1100	RLM	0,81	Wu et al. (2010)
<i>b*</i>					0,77	
WBSF					0,74	
PG	HI	Reflectância	890 - 1750	RMQP	0,87	ElMasry et al. (2011)
<i>L*</i>					0,92	
<i>a*</i>	HI	<i>Scattering</i>	400 - 1100	RLM	0,92	Wu et al. (2012)
<i>b*</i>					0,94	
WBSF					0,83	
pH					0,73	
<i>L*</i>					0,88	
<i>a*</i>	HI	Reflectância	900 - 1700	RMQP	-	ElMasry et al. (2012)
<i>b*</i>					0,81	
SSF					0,83	
WBSF	HI	<i>Scattering</i>	922 - 1739	ADL	~ 80% de acerto (macia ou dura)	Cluff et al. (2013)
SSF	HI	Reflectância	450 - 900	ADL Fisher	~ 90% de acerto (macia ou dura)	Naganathan et al. (2015)

Tabela 1, continua

Atributo de Qualidade	Técnica	Modo	Espectro (nm)	Análise dos Dados	Acurácia (R ²)	Referência
WBSF	NIRS	Reflectância	1100 - 2498	RMQP	0,63	Park et al. (1998)
				RLM	0,67	
WBSF	NIRS	Reflectância	750 - 1098	RCP	0,37 a 0,67	Byrne et al. (1998)
WBSF	NIRS	Reflectância	1100 - 2500	RMQP	0,12 a 0,35	Rødbotten et al. (2000)
WBSF	NIRS	Reflectância	750 - 1100	-	0,58	Venel et al. (2001)
WBSF _(2, 9 e 21 dias)	NIRS	Reflectância	950 - 1700	-	0,69; 0,62 e 0,36	Rødbotten et al. (2001)
L*					0,64 a 0,85	
a*					0,19 a 0,49	
b*					0,44 a 0,75	
PG	NIRS	Transmissão	935 - 2327	RMQP	0,38 a 0,54	Leroy et al. (2003)
PPC		Reflectância			0,25 a 0,47	
WBSF					0,12 a 0,41	
pH _{24h}					0,97	
PPC					0,20	
L*					0,85	
a*	NIRS	Reflectância	400 - 2498	RMQP	0,29	Andrés et al. (2008)
b*					0,49	
CS					0,16	
WBSF					0,65	
pH _{24h}					0,41 a 0,47	
L*					0,59 a 0,87	
a*					0,008 a 0,71	
b*					0,35 a 0,90	
CRA (pressão)	NIRS	Reflectância	1100 - 2500	RMQP	0,48 a 0,58	Prieto et al. (2008)
PG					0,20 a 0,26	
PPC					0,001 a 0,14	
WBSF					0,17 a 0,45	

Tabela 1, continua

Atributo de Qualidade	Técnica	Modo	Espectro (nm)	Análise dos Dados	Acurácia (R ²)	Referência
CRA (pressão)	NIRS	Reflectância	408 - 2493	RMQP, RMQP modificada e RCP	0,87	Ripoll et al. (2008)
WBSF					0,74	
L*					0,55	
a*	Vis-NIRS	Reflectância	400 - 1080	RMQP	0,90	Liu et al. (2003)
b*					0,78	
WBSF	Vis-NIRS	Reflectância	350 - 2500	RMS	0,17 a 0,72	Shackelford et al. (2005)
SSF					0,38 a 0,22	
WBSF	Vis-NIRS	<i>Scattering</i>	450 - 950	RL	0,59	Xia et al. (2007)
WBSF	Vis-NIRS	Reflectância	375 - 1100	Várias regressões	< 0,23	Bowling et al. (2009)
L*					0,86	
a*	Vis-NIRS	Reflectância	350 - 1800	RMQP	0,86	Prieto et al. (2009)
b*					0,91	
PPC					0,35	
SSF _(3 e 14 dias)					0,54 e 0,31	
pH					0,62	
L*					0,70	
a*					0,73	
b*	Vis-NIRS	Reflectância	350 - 1800	RMQP	0,60	De Marchi et al. (2013)
Purga					0,15	
PPC					0,38	
WBSF					0,34	

Tabela 1, conclusão

Atributo de Qualidade	Técnica	Modo	Espectro (nm)	Análise dos Dados	Acurácia (R ²)	Referência
pH					0,52 e 0,06	
<i>L</i> *					0,41 e 0,53	
<i>a</i> *					0,58 e 0,31	
<i>b</i> *	Vis-NIRS	Reflectância	350 - 1800	RMQP	0,57 e 0,17	De Marchi (2013)
<i>C</i> *					0,55 e 0,29	
<i>h</i> *					0,23 e 0,21	
PPC					0,31 e 0,01	
WBSF					0,13 e 0,08	

pH_{24h}: potencial hidrogeniônico 24 horas post mortem; *L**: luminosidade; *a**: índice de vermelho; *b**: índice de amarelo; *c**: saturação; *h**: ângulo de tonalidade; CRA: capacidade de retenção de água (método de pressão); PG: perda por gotejamento; PPC: perda de peso por cozimento; CS: comprimento do sarcômero; SSF: *Slice shear force*; WBSF: *Warner-Bratzler shear force*; HI: imagem hiperespectral; NIRS: espectroscopia do infravermelho próximo; Vis: espectroscopia da região visível; ACD: Análise Canônica Discriminante; ADL: Análise Discriminante Linear (Fisher); RCP: regressão de componentes principais; RLM: Regressão Linear Múltipla; RMQP: Regressão por Mínimos Quadrados Parciais; RMS: regressão múltipla stepwise; RL: regressão linear.

As espectroscopias e as imagens hiperespectrais utilizam um sistema que consiste de cinco componentes: unidade de iluminação, espectrômetro, câmara de alto desempenho com dispositivo de carga acoplado (CCD) ou sensores de semicondutores de óxido de metal complementar (CMOS), unidade de translação operada por um motor de passo e computador equipado com *software* de aquisição de imagem. A unidade de iluminação gera a luz que ilumina a amostra. O espectrômetro gera um único espectro para cada amostra nas espectroscopias e um espectro para cada ponto da amostra na análise de imagens hiperespectrais. A câmera é um detector bidimensional com sensores de alto desempenho, que coleta a informação espectral nas espectroscopias e, simultaneamente, a informação espectral e espacial na análise de imagens hiperespectrais. A unidade de translação é usada para mover a amostra sob as lentes objetivas, de modo que toda a superfície da amostra pode ser digitalizada e o computador controla a velocidade do motor, o tempo de exposição, modo de armazenamento, faixa de comprimento de onda e a aquisição das imagens (MARCHI et al., 2013; PRIETO et al., 2009a; XIONG et al., 2014).

A análise de imagens hiperespectrais, em comparação com as espectroscopias convencionais, possui as vantagens de receber respostas espectrais espacialmente distribuídas em cada pixel de uma imagem da carne. Essa informação gera um cubo tridimensional de dados denominado hipercubo, que contém a informação espacial bidimensional (x, y) e a informação espectral unidimensional λ_i . Para um λ_k fixo, a imagem $I(x, y, \lambda_k)$ representa a imagem da banda única λ_k . Se x e y são fixos, a imagem $I(x, y, \lambda_i)$ representa o espectro ou informação espectral. Estes dados fornecem uma grande quantidade de informação que pode ser analisada para determinar as características físicas e químicas de uma amostra (PRIETO et al., 2009a; XIONG et al., 2014).

As espectroscopias possuem as vantagens de medição relativamente rápida, não usarem reagentes químicos e estimarem mais que um atributo de

qualidade ao mesmo tempo. As técnicas de imagem utilizam, principalmente, o modo de reflectância para avaliar rapidamente os atributos de qualidade com mínima intervenção humana. A imagem hiperespectral integra as virtudes das técnicas de imagem e de espectroscopia para prever diferentes atributos de qualidade, incluindo pH, CRA, cor e maciez. A aplicação de sistemas de análise de imagens hiperespectrais para avaliar e garantir a qualidade de carnes vermelhas ainda precisa superar alguns desafios em razão das grandes dimensões e das limitações de tempo para aquisição e, subsequente, processamento das imagens antes de sua implementação em frigoríficos (NAGANATHAN et al., 2015; PRIETO et al., 2009a; XIONG et al., 2014).

2.5 *Biospeckle laser*

O *Biospeckle laser* ou *Speckle laser dinâmico* é um método ótico que avalia, ao longo do tempo, o padrão de interferência formado quando um material biológico é iluminado por uma luz coerente, como um *laser* (Figura 1). Isto permite monitorar a variação temporal no padrão do *speckle*, a qual pode ser relacionada com a atividade biológica associada a diversos fenômenos físico-químicos da amostra que causam a mudança de posição dos dispersores de luz (AMARAL et al., 2013; BRAGA et al., 2011; RABAL; BRAGA, 2010).

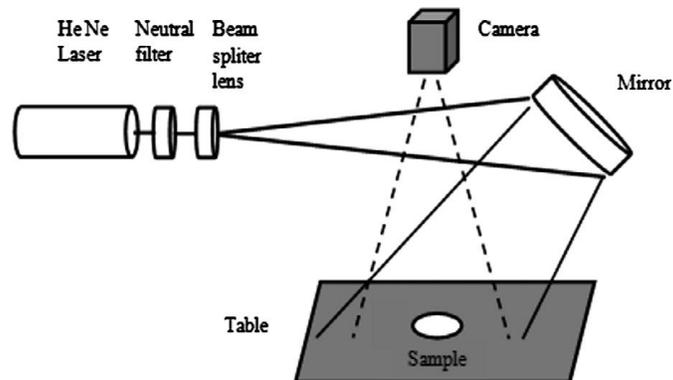


Figura 1 Configuração do *Biospeckle laser*.
 Fonte: Amaral et al. (2013)

A imagem do *speckle* estático (Figura 2), formada pela iluminação de um material biológico por um laser, é capturada em uma escala de cinza de 8 *bits* (256 níveis) por uma câmera digital. Ao longo do tempo, ocorrem alterações nos dispersores de luz do tecido que modificam a forma e a intensidade de cinza dos grãos (*pixels*) desse padrão do *speckle*, tornando-o dinâmico, semelhante a um fervilhamento. Essa variação do padrão do *speckle* é, geralmente, verificada por um determinado tempo ou número de imagens capturadas em uma taxa constante (*frames*) (RABAL; BRAGA, 2010).



Figura 2 *Speckle* capturado após a iluminação de papel branco por um laser.

Várias técnicas de processamento e de análise estatística das imagens podem ser utilizadas para a avaliação do *Biospeckle Laser*. A análise gráfica é realizada para verificar diferentes níveis de atividade em uma mesma amostra, sendo que o processamento das imagens gera um mapa da variabilidade espacial da atividade biológica. Como exemplos, temos os métodos Fujii (FUJII et al., 1985) e de Diferenças Generalizadas (DG) (ARIZAGA et al., 2002). A análise das imagens também pode ser realizada de forma numérica a fim de quantificar o nível de variação do padrão do *speckle* em uma amostra ao longo do tempo e transformá-lo em um único número. Como exemplos, temos o Momento de Inércia, o Método do Contraste e a Autocorrelação (BRAGA et al., 2012; RABAL; BRAGA, 2010).

2.6 Momento de Inércia

Entre as técnicas numéricas para quantificar as alterações no padrão do *speckle*, destaca-se o Momento de Inércia e suas variações, que é um parâmetro adimensional que pode ser relacionado ao nível de atividade biológica. Para isso, é necessária a construção da História Temporal do Padrão do *Speckle* (THSP), uma matriz formada por uma coleção de *pixels* das imagens capturadas ao longo de tempo (Figura 3) (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999; BRAGA et al., 2011; RABAL; BRAGA, 2010).

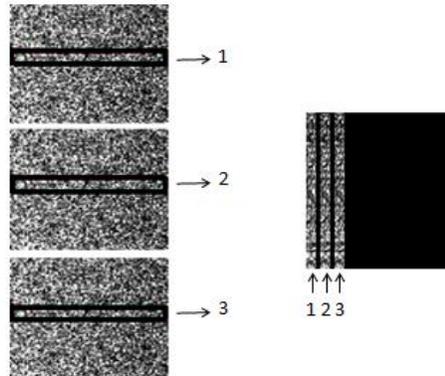


Figura 3 Construção da História Temporal do Padrão do *Speckle* (THSP).
 Fonte: Arizaga, Trivi e Rabal (1999).

Na construção da THSP, uma mesma linha (Figura 3), coluna ou conjunto de *pixels* de todas as imagens capturadas é colocado lado a lado, como colunas, formando uma nova imagem. Essa nova imagem, que é a THSP, possui dimensões que se relacionam com a quantidade de imagens processadas e a quantidade de *pixels* da linha, coluna ou conjunto utilizado em sua construção (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999; RABAL; BRAGA, 2010).

A THSP fornece informações sobre as alterações no padrão do *speckle* ao longo do tempo pela observação de cada linha, que corresponde ao mesmo *pixel* em todas as imagens. Se a THSP for composta por linhas bem definidas, significa que não houve alterações no padrão do *speckle* de uma imagem para a outra, mantendo o mesmo nível de cinza da imagem anterior (Figura 4a). Por outro lado, se a THSP for uma figura completamente distorcida, sem linhas definidas, indica que ocorreram alterações no padrão do *speckle* entre as imagens (Figura 4b). Por meio da inspeção visual das THSP, é possível perceber diferenças entre amostras com diferentes atividades biológicas. Porém, é necessário um método objetivo para a sua quantificação e comparação, *i.e.*, transformar a THSP em um número (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999; BRAGA et al., 2011; RABAL; BRAGA, 2010).

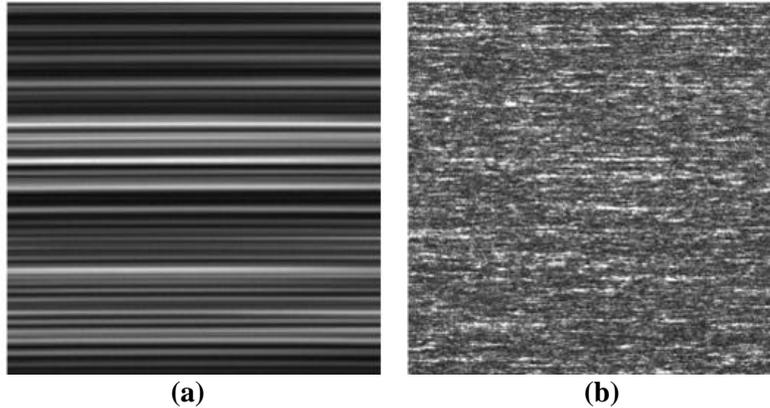


Figura 4 História Temporal do Padrão do *Speckle* (THSP) de uma amostra com (a) baixa atividade e (b) alta atividade.

Fonte: Rabal e Braga (2010).

Um único número pode ser obtido a partir da THSP por meio da Matriz de Ocorrências (MOC) e do Momento de Inércia (MI) (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999; RABAL; BRAGA, 2010). A THSP é transformada em uma matriz de acordo com a Equação 1:

$$MOC = [N_{ij}] \quad (1)$$

em que

MOC: matriz de ocorrências;

N_{ij} : número de ocorrências da intensidade i seguida pela intensidade j ;

i : i -ésima linha da MOC, com valores de intensidade entre 0 e 255;

j : j -ésima coluna da MOC, com valores de intensidade entre 0 e 255.

N_{ij} representa a quantidade de ocorrência da intensidade i seguida pela intensidade j em uma matriz 256 x 256, por causa da escala com 256 níveis de cinza. A diagonal principal da MOC está relacionada a regiões sem mudança nas intensidades de cinza (Figura 5), enquanto que os demais pontos ij representam

ocorrências de alteração de intensidade ao longo do tempo (Figura 6). Portanto, quanto mais distante da diagonal principal, maior a mudança na intensidade de i para j (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999; RABAL; BRAGA, 2010).

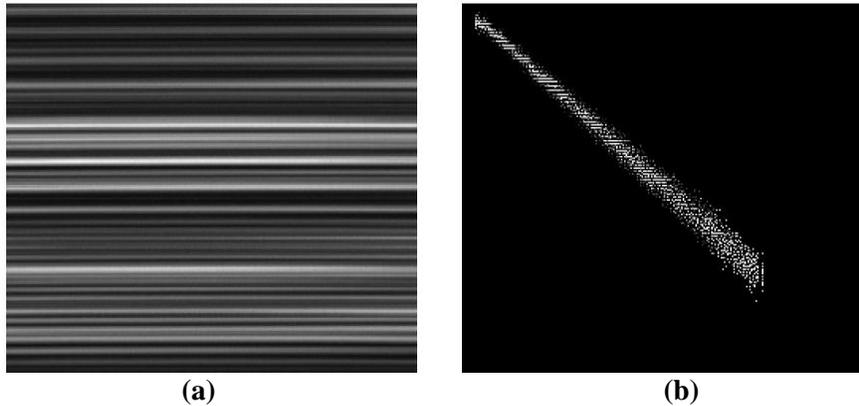


Figura 5 (a) História Temporal do Padrão do *Speckle* (THSP) e (b) Matriz de Ocorrência (MOC) de uma amostra com baixa atividade.

Fonte: Rabal e Braga (2010).

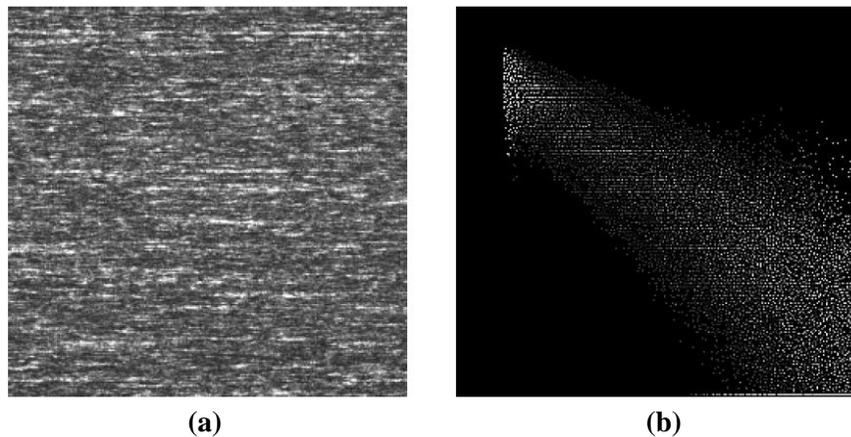


Figura 6 (a) História Temporal do Padrão do *Speckle* (THSP) e (b) Matriz de Ocorrência (MOC) de uma amostra com alta atividade.

Fonte: Rabal e Braga (2010).

Arizaga, Trivi e Rabal (1999) propuseram uma forma de normalização da MOC, em que cada número de ocorrência de intensidade N_{ij} deve ser dividido

pelo somatório do número de ocorrências $\sum_j N_{ij}$ de sua linha i (Equação 2). Desse modo, a soma dos componentes de cada linha da matriz de ocorrências normalizada MOC' é igual a um.

$$MOC' = \left[\frac{N_{ij}}{\sum_j N_{ij}} \right] \quad (2)$$

em que

MOC' : MOC normalizada conforme Arizaga, Trivi e Rabal (1999);
 N_{ij} : número de ocorrências da intensidade i seguida pela intensidade j ;
 $\sum_j N_{ij}$: somatório do número de ocorrências da intensidade i seguida pela intensidade j da linha i ;
 i : i -ésima linha da MOC, com valores de intensidade entre 0 e 255;
 j : j -ésima coluna da MOC, com valores de intensidade entre 0 e 255.

Cardoso e Braga (2014), com o objetivo de melhorar o ajuste dos dados por meio da redução do coeficiente de variação entre as amostras ao longo do tempo, propuseram um novo método de normalização da MOC: cada número de ocorrência de intensidade N_{ij} deve ser dividido pelo somatório do número de ocorrências $\sum_{ij} N_{ij}$ da MOC (Equação 3). Desse modo, a soma dos componentes da matriz de ocorrências normalizada MOC'' é igual a um.

$$MOC'' = \left[\frac{N_{ij}}{\sum_{ij} N_{ij}} \right] \quad (3)$$

em que

MOC'' : MOC normalizada conforme Cardoso e Braga (2014);
 N_{ij} : número de ocorrências da intensidade i seguida pela intensidade j ;
 $\sum_{ij} N_{ij}$: somatório do número de ocorrências da intensidade i seguida pela intensidade j na MOC;
 i : i -ésima linha da MOC, com valores de intensidade entre 0 e 255;
 j : j -ésima coluna da MOC, com valores de intensidade entre 0 e 255.

O Momento de Inércia (MI) é um número adimensional, capaz de quantificar a atividade observada na THSP, obtido por um algoritmo estatístico de segunda ordem (Equação 4). Desse modo, por causa da diferença elevada ao quadrado, pequenas variações na intensidade do *pixel* resultam em baixos valores do MI, enquanto grandes variações contribuem para um alto valor do MI (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999; BRAGA et al., 2011; CARDOSO; BRAGA, 2014).

$$MI = \sum_{ij} \{MOC_{ij} \times (i - j)^2\} \quad (4)$$

em que

MI: Momento de Inércia;

MOC_{ij}: valor *ij* da MOC sem normalização, normalizada conforme Arizaga, Trivi e Rabal (1999) ou normalizada conforme Cardoso e Braga (2014);

i: *i*-ésima linha da MOC, com valores de intensidade entre 0 e 255;

j: *j*-ésima coluna da MOC, com valores de intensidade entre 0 e 255.

O Valor Absoluto de Diferença (AVD), uma variação do MI proposta por Braga et al. (2011), baseia-se no princípio de que a soma das diferenças (Equação 5) é a principal informação pesquisada e que o expoente ao quadrado no cálculo do MI pode ampliar as variações do THSP de uma maneira distorcida (BRAGA et al., 2011; CARDOSO; BRAGA, 2014).

$$AVD = \sum_{ij} \{MOC_{ij} \times (i - j)\} \quad (5)$$

em que

AVD: Valor Absoluto de Diferença;

MOC_{ij}: valor *ij* da MOC normalizada conforme Arizaga, Trivi e Rabal (1999) ou Cardoso e Braga (2014);

i: i-ésima linha da MOC, com valores de intensidade entre 0 e 255;
j: j-ésima coluna da MOC, com valores de intensidade entre 0 e 255.

2.7 Aplicações do *Biospeckle laser*

O *Biospeckle laser* é uma técnica rápida, não invasiva, não destrutiva e de baixo custo. O *Biospeckle laser* é uma linha de pesquisa de grande potencial na área biológica, já sendo aplicado para: monitorar a maturidade e lesões em frutos (PAJUELO et al., 2003; RABELO; BRAGA; FABBRO, 2005; ROMERO et al., 2009; SZYMANSKA-CHARGOT; ADAMIAK; ZDUNEK, 2012), mensurar a taxa respiratória e a atividade de água em cenouras (ALVES; BRAGA; VILAS BOAS, 2013), avaliar o teor de clorofila e a qualidade de maçãs (ZDUNEK; CYBULSKA, 2011; ZDUNEK; HERPPICH, 2012), identificar a viabilidade e a presença de fungos em sementes (BRAGA et al., 2003; BRAGA et al., 2007; RABELO et al., 2011), verificar o crescimento de raízes (BRAGA et al., 2009; RIBEIRO et al., 2014), avaliar a mobilidade em sêmen (CARVALHO et al., 2009), medir o fluxo sanguíneo em várias partes do corpo (BRAY et al., 2006; CHENG et al., 2003; FUJII et al., 1985; LI et al., 2006) e avaliar os atributos de qualidade em biscoitos, biofilmes, emulsões e sorvete (GRANGER et al., 2005; NOVALES et al., 2003; RABAL; BRAGA, 2010).

Na área de qualidade de carnes, Amaral et al. (2013) demonstraram que o *Biospeckle laser* pode fornecer informações relevantes sobre características físico-químicas responsáveis pela cor e maciez da carne bovina maturada. O *Biospeckle laser* apresentou alta correlação com o pH, a força de cisalhamento e vários índices de cor, em especial o ângulo de tonalidade (h^*) e o percentual de metamioglobina (MMb) na superfície da carne. Isto evidenciou o potencial de aplicação do *Biospeckle laser* na quantificação de fenômenos biológicos

relacionados à maturação da carne bovina. Além disso, Amaral et al. (2013) demonstraram que determinadas formas de cálculo do MI/AVD reduzem sua variabilidade e melhoram suas correlações com os indicadores de qualidade da carne bovina. Desse modo, o *Biospeckle Laser* pode se tornar mais robusto e confiável na predição da qualidade da carne bovina.

Atualmente, os *lasers* de Hélio Neon (HeNe) têm sido substituídos por *lasers* de estado sólido, diodo, em pesquisas com configurações experimentais adaptadas às condições de campo ou industriais. Apesar de sua maior qualidade para a obtenção de uma luz coerente, os *lasers* de HeNe possuem um tamanho maior que os *lasers* de estado sólido, diodo, sendo adequados para as condições controladas de um laboratório de ótica. Por outro lado, os *lasers* de estado sólido, diodo, possuem um pequeno tamanho, o que proporciona uma maior facilidade de adaptação às configurações experimentais de campo ou industriais.

No entanto, os *lasers* de estado sólido de diodo podem ser afetados por um fenômeno denominado *mode hopping* e, logo, podem influenciar os resultados obtidos. Ohtsu, Otsuka e Teramachi (1985) constataram que as flutuações em *lasers* de semicondutores estavam sendo detectadas empiricamente e observaram, por meio de simulações, que o *mode hopping* tem uma origem espontânea. Ahmed (2003) defendeu que em um *laser* de semicondutor podem ser observados dois fenômenos, o *jittering* e o *mode hopping*, e que esse último poderia causar um violento aumento das flutuações, afetando a saída total do laser. Ahmed, Yamada e Abdulrhmann (2001) já tinham defendido que o *mode hopping* poderia ser causado por uma competição de modos que estava relacionada a um efeito de saturação de ganho não linear. Desse modo, é importante avaliar se o *mode hopping* pode ocorrer nas configurações experimentais do *Biospeckle laser* e qual o seu comprometimento nos resultados obtidos. Afinal, isso poderia inviabilizar o desenvolvimento de equipamentos envolvendo o *laser* de semicondutor.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais foram aprovados pela Comissão de Ética no Uso de Animais da UFLA, protocolo 048/2012. Os animais foram criados nas dependências do Departamento de Zootecnia da UFLA, o abate foi realizado nas dependências do Departamento de Zootecnia da UFV e as análises dos indicadores de qualidade e do *Biospeckle laser* foram realizadas nos Laboratórios de Tecnologia de Carnes e Derivados do Departamento de Ciência dos Alimentos da UFLA e do Departamento de Tecnologia de Alimentos da UFV.

3.1 Animais

Dezessete bovinos, machos inteiros, da raça Nelore (*Bos indicus*) foram adquiridos de três diferentes fazendas de gado de corte do estado de Minas Gerais, os quais eram filhos de três touros puros da raça Nelore. Dezessete bovinos, machos inteiros, da raça Aberdeen Angus (*Bos taurus*) foram adquiridos de três diferentes fazendas de gado de corte do estado do Rio Grande do Sul, os quais eram filhos de três touros puros da raça Aberdeen Angus. Os touros foram selecionados com base em sua importância para a bovinocultura de corte brasileira. Esse procedimento foi realizado para utilizar animais que representassem ambas as raças e evitar um possível efeito de touro. Os animais, com 20 meses de idade, foram transportados para as dependências do Departamento de Zootecnia da UFLA, no estado de Minas Gerais, e terminados em confinamento (dieta composta de silagem de milho e concentrado: grão moído de milho, farelo de soja e mistura mineral) por 112 dias e abatidos com média de peso de 492 ± 61 kg.

3.2 Abate dos animais e coleta das amostras

Os animais foram insensibilizados por concussão cerebral e sangrados na posição vertical pela secção das veias jugulares e artérias carótidas, segundo as normas de bem estar e de abate regulamentadas pela legislação brasileira. Após o abate, as carcaças foram penduradas pelo forâmen pélvico e permaneceram em câmara fria sob refrigeração (4 ± 1 °C) por 24 horas. Em seguida, seis bifês com 2,5 cm de espessura foram retirados, a partir da 6ª vértebra torácica, do contrafilé (músculo *Longissimus thoracis*) direito. Cada unidade experimental foi composta por um bife e meio e distribuída aleatoriamente nos tempos de maturação 0 (24 horas *post mortem*), 7, 14 e 21 dias.

As unidades experimentais foram identificadas, pesadas, acondicionadas a vácuo (embaladora BS420, R. Baião, Brasil) em embalagens de náilon-polietileno e armazenadas sob temperaturas de refrigeração ($1 \pm 0,5$ °C), em câmara climática (modelo EL202, EletroLab, Brasil), nos respectivos tempos de maturação.

Após os tempos de maturação, primeiramente, a purga foi mensurada na unidade experimental, *i.e.*, em um bife e meio. Em seguida, foram analisados, nessa ordem, o pH, a capacidade de retenção de água (CRA), o comprimento de sarcômero (CS) e o índice de fragmentação (IFM) na metade do bife. Ao mesmo tempo, foram avaliados, nessa sequência, o *Biospeckle laser*, a cor instrumental (L^* , a^* , b^* , C^* e h^*), as formas químicas da mioglobina (O_2Mb , Mb^+ e MMb), a perda de peso por cozimento (PPC) e a força de cisalhamento (FC) no bife inteiro.

3.3 Purga

A amostra maturada foi retirada da embalagem e novamente pesada para a determinação da perda de exsudado durante a maturação. A purga foi expressa como porcentagem em relação ao peso inicial (RAMOS; GOMIDE, 2007).

3.4 pH

O pH foi mensurado, em triplicata, pela inserção de eletrodo de inserção, acoplado a um pHmetro portátil HI 99163 (*Hanna Instruments, Woonsocket, RI, EUA*), em regiões centrais da amostra (RAMOS; GOMIDE, 2007).

3.5 Capacidade de retenção de água (CRA)

A capacidade de retenção de água (CRA) foi realizada pelo método de pressão em papel de filtro, descrito por Honikel e Hamm (1994), com pequenas modificações. Amostra de 300 ± 100 mg de carne foi colocada sobre um papel de filtro previamente seco e o conjunto foi prensado com um peso de 5 kg por 5 minutos. Em seguida, as áreas delimitadas pela carne prensada (A_c) e pelo líquido exsudado (A_e) no papel de filtro foram mensuradas, utilizando o *software ImageJ*[®] 1.42q (*National Institute of Health, USA*). A CRA foi expressa como a razão A_c/A_e .

3.6 Índice de fragmentação miofibrilar (IFM)

O índice de fragmentação miofibrilar (IFM) foi realizado, conforme o protocolo descrito por Davey e Gilbert (1969), com pequenas modificações. Uma alíquota da suspensão de miofibrilas foi diluída com solução de extração

até a concentração proteica de $0,5 \pm 0,05$ mg/mL, mensurada pelo método de Biureto, para a leitura da densidade ótica, a 540 nm, em espectrofotômetro *Genesys 10 UV (Thermo Scientific, USA)*. A densidade ótica foi multiplicada por 200 para obtenção do IFM. Maiores valores de IFM indicam maior proteólise da estrutura miofibrilar.

3.7 Comprimento do sarcômero (CS)

O comprimento do sarcômero (CS) foi avaliado na amostra de carne crua, fixada de acordo com a metodologia descrita por Koolmees, Korteknie e Smulders (1986), com pequenas modificações. Filetes do músculo (2,5 x 1,0 x 1,0 cm) com as fibras dispostas longitudinalmente foram acondicionados em tubos tipo *ependorf* contendo solução refrigerada (4 °C) de sacarose 0,2 M em tampão NaHPO_4 0,1 M (pH 7,2) e congelados (-20 °C) logo após os tempos de maturação. Após descongelamento à temperatura ambiente durante a noite, o comprimento médio de 18 sarcômeros foi mensurado em diferentes fibras musculares por difração a laser (modelo 05LHR073, *Melles Griot, Carlsbad, USA*), conforme metodologia descrita por Cross, West e Dutson (1981).

3.8 Perda de Peso por Cozimento (PPC)

A amostra foi pesada e grelhada entre 160 a 180 °C (Mega Grill; Britânia, Brasil) até atingir a temperatura de 71 °C (AMERICAN MEAT SCIENCE ASSOCIATION, 1995), a qual foi monitorada por um termômetro digital (TD-880 com termopar tipo K; Icel, Brasil) inserido no seu centro geométrico. Em seguida, a amostra foi resfriada à temperatura ambiente por 2 horas e novamente pesada. A PPC foi determinada como a diferença de peso antes e após o cozimento e expressa como percentagem em relação ao peso inicial.

3.9 Força de cisalhamento (FC)

A força de cisalhamento (FC) foi realizada nas amostras provenientes da PPC, de acordo com o método *Warner-Bratzler Square Shear Force* (WBsSF), descrito por Silva et al. (2015). Seis *cores* retangulares (1,0 x 1,0 x 2,5 cm) foram manualmente removidos de cada bife, no sentido das fibras musculares, e cisalhados transversalmente, a uma velocidade de $3,33 \text{ mm.s}^{-1}$, por uma lâmina tipo *Warner-Bratzler* acoplada a um texturômetro *TA.XTplus* (Stable Micro Systems Ltda., *Godalming, Surrey, UK*). A força de cisalhamento (kgf) foi determinada como a média das forças máximas registradas no cisalhamento dos seis *cores* de cada bife.

3.10 Cor Instrumental

A cor da carne foi avaliada em espectrofotométrico CM-700 (*Kônica Minolta Sensing Inc.*, Osaka, Japão) padronizado com porta de abertura de 8 mm, modo de reflectância especular excluída (SCE), iluminante A, ângulo de 10° para observador e sistema de cor CIELAB. Após exposição da amostra ao ambiente por 60 minutos (*blooming*), cinco leituras foram realizadas em posições distintas na superfície da carne para a obtenção da média das coordenadas de cor: luminosidade (L^*), índice de vermelho (a^*), índice de amarelo (b^*), saturação ($C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$) e ângulo de tonalidade ($h^* = \tan^{-1}(b^*/a^*)$) (HUNT et al., 1991).

3.11 Formas químicas da mioglobina

Simultaneamente às leituras de cor instrumental, o espectrofotométrico CM-700 (*Kônica Minolta Sensing Inc.*, Osaka, Japão) obteve as curvas de

reflectância entre 400 e 730 nm, com intervalo de 10 nm, com o modo de reflectância especular incluída (SCI). Os valores intermediários de reflectância (473, 525 e 572 nm) foram calculados por interpolação linear. O conteúdo relativo dos pigmentos oximioglobina (O_2Mb), deoximioglobina (Mb^+) e metamioglobina (MMb) da carne foram estimados pelo método matemático de Krzywicki (1979).

3.12 *Biospeckle laser* e momento de inércia

A avaliação do *Biospeckle Laser* foi realizada com o uso de uma configuração experimental adaptada às condições industriais, conforme metodologia descrita por Amaral et al. (2013), nas amostras embaladas (E) e também após serem desembaladas (D) e expostas ao ar atmosférico por 60 minutos à temperatura ambiente. O protocolo do teste de qualidade, proposto por Moreira, Cardoso e Braga (2014), foi realizado durante a montagem do *setup* móvel a fim de garantir a robustez das características fundamentais dos padrões do *speckle*, principalmente aqueles relacionados à saturação, sub-exposição, homogeneidade e contraste dos grãos.

Algumas adaptações foram realizadas na configuração experimental para tentar proporcionar um mínimo de condições controladas semelhantes àsquelas de um laboratório de ótica (Figura 7). Nessa configuração experimental adaptada às condições industriais, foram utilizadas espumas de alta densidade e uma pedra de mármore como base para a montagem e a fixação dos suportes do laser e do mini-microscópio com fitas adesivas para a filtragem de resíduo (vibração) e uma caixa de papelão para proporcionar o isolamento da área de trabalho e a ausência de iluminação.

As amostras foram iluminadas com uma luz coerente, de um modo homogêneo, e os padrões de interferência formados nelas foram capturados por

um mini-microscópio, com função semelhante à de uma câmera CCD, com 640 x 480 pixels. A luz coerente foi um laser de estado sólido, diodo, comprimento de onda de 632 nm, potência de 3 mW, ampliadas por um conjunto de lentes suficientes para cobrir toda a amostra, com função semelhante à de um laser de HeNe (Figura 7). Em cada sessão de iluminação foi armazenado um conjunto de 128 imagens em níveis de cinza (8 bits), relativas ao *speckle* dinâmico, em intervalos de 0,1 segundos. A média de cinco sessões de iluminação, realizadas em posições distintas na superfície da carne, foi obtida a fim de garantir a representatividade da atividade biológica da amostra.

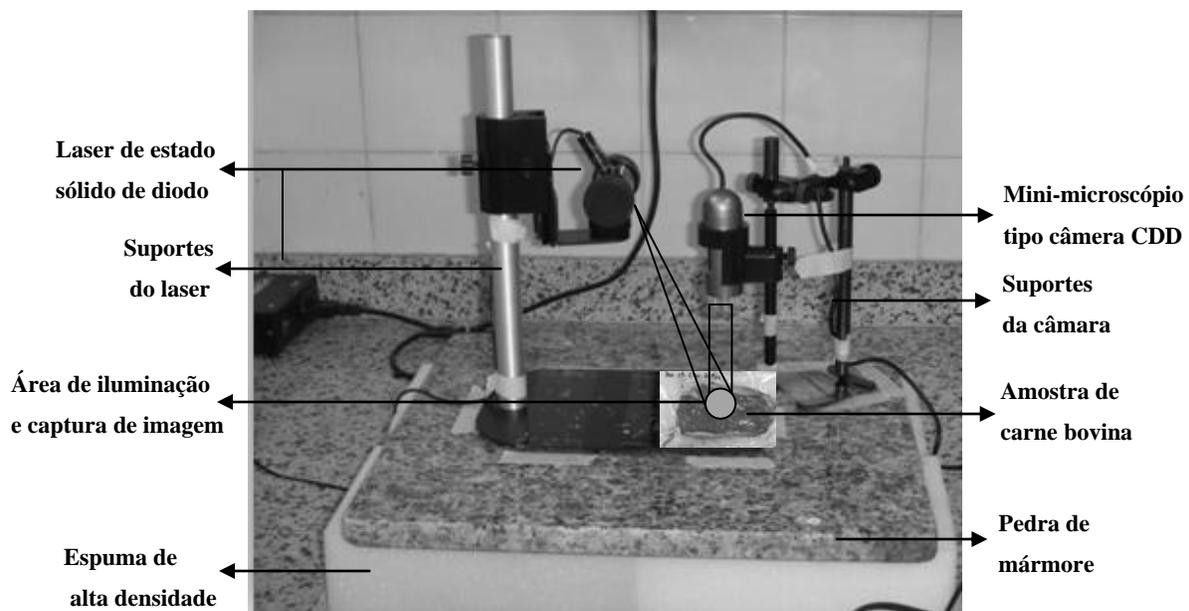


Figura 7 Configuração experimental do *setup* móvel do *Biospeckle Laser*.

A análise das imagens, provenientes da iluminação das amostras pelo laser, foi realizada no *software Scilab*[®] (Scilab Enterprises S.A.S, Oesay, FR) por meio da construção da História Temporal do Padrão do *Speckle* (THSP) por duas técnicas distintas: a primeira, utilizando a linha horizontal central (L; 640

pixels) das 128 imagens, e a segunda, utilizando os mesmos 640 pontos aleatórios nas 128 imagens, a fim de que ambos os THSP tivessem as mesmas dimensões (128 x 640 pixels). Em seguida, foram calculados cinco Momentos de Inércia (MI) (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999) e suas variações, os Valores Absolutos de Diferenças (AVD) (BRAGA et al., 2011) para cada THSP, avaliando diferentes normalizações: sem normalização (SN), normalização proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999) (A) ou por Cardoso e Braga (2014) (C). No total, foram determinados 20 momentos de inércia (2 embalagens x 2 THSP x 5 MI/AVD). Maiores valores de momentos de inércia, geralmente, indicam maior atividade biológica.

3.13 Análise estatística

Os tratamentos foram dispostos em um delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema de parcelas subdivididas, com raça (*Nelore* e *Aberdeen Angus*) na parcela e tempo de maturação (0, 7, 14 e 21 dias) na sub-parcela. As análises estatísticas foram realizadas no *software SAS[®] System for WindowsTM*, versão 9.2 (*SAS Institute Inc., Cary, NC, USA*) em nível de significância de 5%.

Os efeitos de raça, de tempo de maturação e de sua interação sobre os momentos de inércia e os indicadores de qualidade da carne bovina foram determinados por análise de variância (ANOVA). Em seguida, de acordo com a significância da interação, o efeito de raça foi testado pelo teste *F* e o efeito de tempo de maturação foi testado pelo teste de *Tukey*.

Análise de correlação de *Pearson* foi realizada entre os momentos de inércia e os indicadores de qualidade da carne bovina, cujos coeficientes (*r*) foram testados pelo teste *t de Student*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Retenção de água e maciez

A purga foi ($P < 0,05$) afetada pela interação entre raça e tempo de maturação (Tabela 2). Em ambas as raças, houve ($P < 0,05$) aumento da purga até o 14º dia de maturação, o qual foi mais pronunciado na carne de Nelore (Tabela 3). A perda de água da carne é importante para a indústria em razão de sua implicação econômica e na multiplicação de microrganismos. Menor retenção de água pode causar maiores perdas de peso e de rendimento em cortes cárneos (HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; TROY; KERRY, 2010). Além disso, maior exsudação na embalagem pode causar perdas em aparência, conservação, textura, sabor e valor nutricional, prejudicando a atratividade da carne para o consumidor (HUGHES et al., 2014; PEARCE et al., 2011).

A carne de Nelore apresentou ($P < 0,05$) menores valores de pH, comprimento de sarcômero (CS), capacidade de retenção de água (CRA) e índice de fragmentação miofibrilar (IFM), e maior valor de força de cisalhamento (FC) que a carne de Angus. A perda de peso por cozimento (PPC) não diferiu ($P > 0,05$) entre as raças (Tabela 2).

A carne de animais *Bos indicus*, como o Nelore, geralmente, possui menor maciez (maior FC) que a carne de animais *Bos taurus*, como o Angus (BRESSAN et al., 2011; JOHNSON et al., 1990; SHACKELFORD et al., 1991; WHEELER et al., 1990; WHIPPLE et al., 1990). Várias pesquisas demonstraram que à medida que a proporção de *Bos indicus* aumenta no cruzamento, ocorre uma redução na maciez da carne bovina ao mesmo tempo em que há um aumento em sua variabilidade (CROUSE et al., 1989; GURSANSKY et al., 2010; MARSHALL, 1994; RESTLE et al., 1999; WHIPPLE et al., 1990).

Tabela 2 Efeitos da raça e do tempo de maturação sobre os indicadores de qualidade de carne (média ± erro padrão)

Indicador de Qualidade	Raça ¹		Tempo de Maturação ²				P(F)			<i>r</i> ³ (<i>tempo</i>)
	Angus	Nelore	0	7	14	21	R	T	RxT	
pH	5,63 ± 0,01 ^a	5,59 ± 0,01 ^b	5,65 ± 0,02 ^a	5,60 ± 0,02 ^{ab}	5,59 ± 0,02 ^b	5,60 ± 0,02 ^{ab}	0,02	0,02	0,35	-0,17
Purga (%)	1,81 ± 0,12	2,35 ± 0,18	0,67 ± 0,05	1,78 ± 0,11	2,76 ± 0,19	3,11 ± 0,20	0,03	<0,0001	0,01	0,72
CRA	0,258 ± 0,006 ^a	0,241 ± 0,004 ^b	0,247 ± 0,005	0,240 ± 0,005	0,249 ± 0,008	0,262 ± 0,009	0,03	0,1298	0,19	0,15
PPC (%)	27,07 ± 0,64	26,96 ± 0,70	21,06 ± 0,99 ^c	27,12 ± 0,65 ^b	29,96 ± 0,48 ^a	29,93 ± 0,65 ^a	0,89	<0,0001	0,37	0,60
FC (kgf)	5,06 ± 0,15 ^b	6,41 ± 0,19 ^a	7,25 ± 0,20 ^a	5,91 ± 0,22 ^b	5,15 ± 0,22 ^c	4,64 ± 0,20 ^d	0,01	<0,0001	0,60	-0,62
CS (µm)	2,31 ± 0,04 ^a	2,04 ± 0,03 ^b	2,27 ± 0,06 ^a	2,16 ± 0,06 ^{ab}	2,14 ± 0,05 ^{ab}	2,13 ± 0,06 ^b	0,01	0,03	0,96	-0,14
IFM	53,75 ± 2,22 ^a	45,80 ± 2,13 ^b	33,96 ± 1,74 ^c	48,84 ± 2,70 ^b	55,90 ± 3,02 ^{ab}	60,41 ± 2,97 ^a	0,04	<0,0001	0,16	0,53

R: raça; T: tempo de maturação; P(F): probabilidade do teste F; pH: potencial hidrogeniônico; CRA: capacidade de retenção de água; PPC: perda de peso por cozimento; FC: força de cisalhamento; CS: comprimento de sarcômero; IFM: índice de fragmentação miofibrilar.

¹ Médias seguidas por diferentes letras minúsculas na linha diferem pelo teste F em nível de 5% de probabilidade.

² Médias seguidas por diferentes letras minúsculas na linha diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

³ Números em negrito indicam coeficientes de correlação entre os indicadores de qualidade e o tempo de maturação significativos pelo teste *t de Student* em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 3 Efeitos do tempo de maturação sobre a purga (média ± erro padrão) dentro de cada raça

Indicador de Qualidade	Raça	Tempo de Maturação ¹			
		0	7	14	21
Purga (%)	Angus	0,70 ± 0,08 ^a	1,50 ± 0,14 ^b	2,45 ± 0,21 ^c	2,58 ± 0,20 ^c
	Nelore	0,63 ± 0,06 ^a	2,05 ± 0,15 ^b	3,07 ± 0,30 ^c	3,63 ± 0,31 ^c

¹ Médias seguidas por diferentes letras minúsculas na linha diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Menores valores de pH e de CS, geralmente, causam uma redução da ligação da água com as proteínas musculares e do espaço disponível para a água dentro da estrutura miofibrilar da carne, diminuindo a sua CRA e aumentando a exsudação (HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; PEARCE et al., 2011). Menores valores de pH contribuem para reduzir a CRA por causa da maior proximidade com o ponto isoelétrico das proteínas da carne, principalmente da miosina (5,3). Considerando que 85% da água se localizam entre as miofibrilas, com a redução do pH em direção ao PI e o desenvolvimento do *rigor mortis* durante a conversão do músculo em carne, o sarcômero encolhe, reduzindo os espaços dentro da estrutura miofibrilar e expulsando a água para o sarcoplasma e, posteriormente, para o espaço extracelular após o sarcolema se tornar mais permeável (HONIKEL, 2004; HONIKEL et al., 1986; HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; OFFER, 1991; OFFER; COUSINS, 1992; OFFER; KNIGHT, 1988; OFFER; TRINICK, 1983). Essas alterações também contribuem para o aumento da FC em razão da redução da água intramuscular, com conseqüente aumento da resistência das fibras musculares (HUGHES et al., 2014; KOOHMARAIE et al., 2002; PEARCE et al., 2011; RHEE et al., 2004; WHEELER; KOOHMARAIE, 1999).

No presente estudo, o pH foi ($P < 0,05$) inversamente correlacionado com a purga ($r = -0,37$) e com a PPC ($r = -0,27$), enquanto o CS foi ($P < 0,05$) inversamente correlacionado com a purga ($r = -0,28$) (Tabela 4). Desse modo, os menores ($P < 0,05$) valores de pH e de CS da carne de Nelore, apesar de estarem dentro da faixa considerada normal, podem explicar, em parte, sua menor ($P < 0,05$) CRA. De uma maneira geral, animais zebuínos possuem temperamento mais reativo que animais taurinos e, por isso, nas mesmas condições de manejo pré-abate, animais com maior nível de *Bos indicus* no cruzamento possuem uma maior taxa glicolítica no período *post mortem* inicial, proporcionando carnes com menores valores de pH (SILVEIRA; FISCHER; SOARES, 2006).

Tabela 4 Correlação de *Pearson*¹ entre os indicadores de qualidade de carne

	pH	Purga	CRA	PPC	FC	CS
Purga	-0,37					
CRA	0,08	-0,03				
PPC	-0,27	0,58	0,09			
FC	0,12	-0,45	-0,13	-0,34		
CS	0,08	-0,28	0,01	-0,06	-0,05	
IFM	-0,15	0,47	0,12	0,28	-0,62	-0,19

pH: potencial hidrogeniônico; CRA: capacidade de retenção de água; PPC: perda de peso por cozimento; FC: força de cisalhamento; CS: comprimento de sarcômero; IFM: índice de fragmentação miofibrilar.

¹ Números em negrito indicam coeficientes significativos pelo teste *t de Student* em nível de 5% de probabilidade.

O pH também pode afetar a maciez da carne por meio do seu efeito sobre a atividade das enzimas proteolíticas, principalmente a μ -calpaína, durante a conversão do músculo em carne. Menores valores de pH reduzem a atividade da μ -calpaína, o que proporciona menor proteólise (IFM) e, logo, maior FC (GEESINK et al., 2006; KEMP et al., 2010; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; NOWAK, 2011). No entanto, a menor maciez em carnes de animais *Bos indicus* que de animais *Bos taurus* é atribuída, principalmente, à sua maior atividade de calpastatina, o inibidor endógeno das calpaínas, o que resulta na necessidade de maiores tempos de maturação para obter níveis semelhantes de maciez (KEMP et al., 2010; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; SHACKELFORD et al., 1994; WHIPPLE et al., 1990).

Estudos têm verificado que a calpastatina, por meio de seu efeito inibitório sobre a atividade de μ -calpaína, é responsável por cerca de 40 a 45% da variação da maciez da carne bovina (FERGUSON et al., 2000; KOOHMARAIE, 1994; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; SHACKELFORD et al., 1991; SHACKELFORD et al., 1994; WHIPPLE et al., 1990). Por isso, a proteólise induzida pela μ -calpaína é, geralmente, menor na carne de animais *Bos indicus* que na carne de

animais *Bos taurus*, como observado, no presente estudo, pelo menor IFM e maior FC na carne de Nelore que de Angus. Duarte et al. (2013) observaram maior atividade de calpastatina no músculo *Longissimus* de Nelore, o que proporcionou uma carne com menor proteólise e menor maciez em comparação ao Angus. No presente estudo, o IFM foi ($P < 0,05$) inversamente correlacionado com a FC ($r = -0,62$), sendo responsável por quase 40% da variação na maciez da carne bovina (Tabela 4).

Apenas o CS do tempo 21 foi ($P < 0,05$) menor que aquele do tempo 0 (Tabela 2), porém seus valores foram similares aos relatados para o músculo *Longissimus* de carcaças bovinas submetidas à pendura pelo foramen pélvico (AHNSTRÖM; HUNT; LUNDSTRÖM, 2012; BOUTON et al., 1973; HOU et al., 2014). No entanto, com a maturação, a proteólise se torna mais importante que o CS (KOOHMARAIE, 1996; WHEELER; KOOHMARAIE, 1999). Koohmaraie (1996) sugere que a relação entre o CS e a FC é alterada durante a maturação: no primeiro dia *post mortem* espera-se uma alta correlação entre o CS e a FC, enquanto que, ao longo do tempo de maturação, esta correlação se torna mais fraca. Isto é coerente com a ausência de correlação ($P > 0,05$) do CS com o tempo (Tabela 2) e a FC (Tabela 4), observada no presente estudo.

Apenas o pH do 14° dia de maturação foi ($P < 0,05$) menor que aquele do tempo 0, porém seus valores permaneceram próximos à faixa considerada normal para a carne bovina (5,60 a 5,80). A CRA não foi ($P > 0,05$) afetada pelo tempo de maturação, enquanto a PPC aumentou ($P < 0,05$) até o 14° dia de maturação (Tabela 2). A purga também aumentou ($P < 0,05$), em ambas as raças, até o 14° dia de maturação (Tabela 3).

O aumento na purga ao longo do tempo de maturação ($r = 0,72$) é atribuído à liberação e drenagem progressiva da água intracelular para o espaço extracelular, o que pode ser induzida pelo encolhimento da estrutura miofibrilar (HUGHES et al., 2014; OFFER; KNIGHT, 1988). Assim, o nível de degradação

das proteínas citoesqueléticas, principalmente da desmina, é importante para a CRA da carne (PEARCE et al., 2011), sendo que sua integridade é negativamente correlacionada com a perda de água (HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014). Considerando que a integridade das proteínas citoesqueléticas é necessária para transmitir o encolhimento das miofibrilas para a célula como um todo (HUGHES et al., 2014; OFFER; KNIGHT, 1988), uma degradação limitada da desmina durante a maturação resulta no encolhimento da estrutura miofibrilar, o que contribui para que a água seja expulsa para o espaço extracelular entre feixes e fibras musculares (canais de gotejamento) e, posteriormente, para a superfície da carne (HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; OFFER; COUSINS, 1992; OFFER et al., 1989; OFFER; TRINICK, 1983; PEARCE et al., 2011), gerando a exsudação (purga).

As diferenças observadas entre a CRA e a purga ocorrem em razão dos diferentes métodos de mensuração: na purga a única força aplicada é a pressão negativa causada pelo vácuo da embalagem, enquanto que uma força mecânica externa (pressão) é usada para forçar a saída da água na CRA. Honikel e Hamm (1994) descrevem que, embora demorados, métodos que não aplicam força externa são mais sensíveis na mensuração da CRA. Nestes métodos, como na purga, apenas a água dos espaços extracelulares é exsudada, enquanto que os métodos que aplicam força externa, como a pressão em papel de filtro, induzem a saída tanto da água intracelular quanto dos espaços extracelulares (HONIKEL; HAMM, 1994; OFFER; KNIGHT, 1988). Isto explica a diferença contraditória observada entre a CRA e a purga. Durante o período de maturação, a água extracelular da carne é progressivamente drenada através dos canais de gotejamento formados, resultando ($P < 0,05$) no aumento da purga. A menor presença de água nos espaços extracelulares com o tempo de maturação, associada à maior capacidade de acomodação da água intracelular em razão à

degradação das proteínas citoesqueléticas, explicam a manutenção ($P > 0,05$) da CRA ao longo do tempo de maturação.

A carne maturada apresenta pronunciado encolhimento das fibras musculares após o cozimento (BOAKYE; MITTAL, 1993; HUGHES et al., 2014; STRAADT et al., 2007). Desse modo, a perda de água durante o cozimento é, geralmente, maior em carnes maturadas que naquelas não maturadas, mas isto depende do tempo de maturação ($r = 0,60$) e das temperaturas pré-rigor (BERTRAM et al., 2004; SHANKS; WULF; MADDOCK, 2002; STRAADT et al., 2007; WARNER et al., 2014a; WARNER et al., 2014b). O aumento da PPC ocorre porque a estrutura proteica das carnes maturadas, enfraquecida pela degradação das proteínas miofibrilares e citoesqueléticas, possivelmente não consegue reter a água durante o cozimento (HUGHES et al., 2014; PEARCE et al., 2011; WU et al., 2006). Por isso, o aumento da proteólise (IFM) causa maiores purgas ($r = 0,47$) e PPC ($r = 0,28$) e, conseqüentemente, carnes com maior purga também apresentam maior PPC ($r = 0,58$) (Tabela 4).

O IFM do tempo 0 foi ($P < 0,05$) menor que aquele do tempo 7, o qual foi ($P < 0,05$) menor que o IFM aos 21 dias de maturação. O IFM do 14º dia de maturação foi semelhante ($P > 0,05$) àqueles dos seus tempos adjacentes. Para todos os tempos de maturação avaliados, a FC do tempo posterior sempre foi ($P < 0,05$) menor que aquela do tempo anterior. Por isso, o IFM foi ($P < 0,05$) positivamente correlacionado ($r = 0,53$), enquanto que a FC foi ($P < 0,05$) negativamente correlacionada ($r = -0,62$) com o tempo de maturação (Tabela 2). As carnes maturadas são, normalmente, mais macias. Diversas pesquisas demonstraram que o sistema proteolítico calpaína possui um papel central na proteólise *post mortem* e, logo, no amaciamento da carne (GEESINK et al., 2006; GOLL et al., 2003; KOOHMARAIE, 1992; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010). Durante a maturação, a

ação prolongada da μ -calpaína é a principal responsável pelas mudanças na estrutura do tecido muscular e, logo, na maciez da carne (GEESINK et al., 2006; GOLL et al., 2003; KEMP et al., 2010; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; NOWAK, 2011). Durante o amaciamento, ocorre a degradação das principais estruturas (enfraquecimento de miofibrilas, fragmentação, enfraquecimento e degradação da linha Z e da banda I) e proteínas miofibrilares e citoesqueléticas (troponinas T e I, titina, desmina, distrofina, nebulina e vinculina) da carne, o que causa o aumento do IFM e a redução da FC (GEESINK et al., 2006; KEMP et al., 2010; KOOHMARAIE, 1994; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN GEESINK et al., 2006; 2010; NOWAK, 2011). Isso é corroborado pela correlação negativa e intermediária ($P < 0,05$) entre o IFM e a FC ($r = -0,62$) e explica porque as carnes maturadas são mais macias (menor FC), apesar de apresentarem maior perda de água como purga ($r = -0,45$) e PPC ($r = -0,34$) (Tabela 4).

4.2 Cor e formas químicas da mioglobina

Houve ($P < 0,05$) efeito de interação entre raça e tempo de maturação sobre o conteúdo relativo de oximioglobina (O_2Mb) (Tabela 5). Na carne de Angus, a O_2Mb dos três últimos tempos de maturação foram ($P < 0,05$) maiores que aquele do tempo 0, enquanto que, na carne de Nelore, houve ($P < 0,05$) um aumento dos valores da O_2Mb ao longo do tempo de maturação (Tabela 6). O conteúdo relativo de deoximioglobina (Mb^+) diminuiu ($P < 0,05$) até o 14º dia de maturação. O conteúdo relativo de metamioglobina (MMb) não ($P > 0,05$) alterou durante o tempo de maturação (Tabela 5).

Tabela 5 Efeitos de raça e de tempo de maturação sobre os indicadores de cor de carne (média ± erro padrão)

Indicador de Cor	Raça ¹		Tempo de Maturação ²				P(F)			<i>r</i> ³ (tempo)
	Angus	Nelore	0	7	14	21	R	T	RxT	
<i>L</i> *	49,60 ± 0,15	50,25 ± 0,19	49,51 ± 0,21	49,85 ± 0,26	50,08 ± 0,27	50,27 ± 0,26	0,14	0,0017	0,02	0,19
<i>a</i> *	14,26 ± 0,18	13,55 ± 0,25	12,14 ± 0,23 ^c	14,20 ± 0,32 ^b	14,76 ± 0,26 ^a	14,53 ± 0,23 ^{ab}	0,12	<0,0001	0,23	0,47
<i>b</i> *	10,35 ± 0,14	10,08 ± 0,21	8,88 ± 0,18 ^b	10,46 ± 0,26 ^a	10,81 ± 0,21 ^a	10,70 ± 0,18 ^a	0,44	<0,0001	0,14	0,45
<i>C</i> *	17,63 ± 0,23	16,89 ± 0,32	15,04 ± 0,29 ^b	17,64 ± 0,41 ^a	18,30 ± 0,33 ^a	18,05 ± 0,29 ^a	0,20	<0,0001	0,18	0,47
<i>h</i> *	35,96 ± 0,11	36,57 ± 0,14	36,18 ± 0,18	36,32 ± 0,20	36,20 ± 0,19	36,37 ± 0,19	0,05	0,64	0,27	0,05
MMb (%)	16,50 ± 0,38	15,97 ± 0,26	16,14 ± 0,56	15,86 ± 0,44	16,18 ± 0,40	16,77 ± 0,42	0,52	0,09	0,88	0,09
Mb ⁺ (%)	12,16 ± 1,04	14,49 ± 1,32	27,36 ± 1,16 ^a	10,90 ± 1,14 ^b	8,18 ± 0,72 ^c	6,86 ± 0,48 ^c	0,11	<0,0001	0,06	-0,73
O ₂ Mb (%)	71,34 ± 0,98	69,54 ± 1,28	56,49 ± 0,91	73,24 ± 1,10	75,65 ± 0,71	76,37 ± 0,35	0,16	<0,0001	0,02	0,74

R: raça; T: tempo de maturação; P(F): probabilidade do teste F; *L**: luminosidade; *a**: índice de vermelho; *b**: índice de amarelo; *C**: saturação; *h**: ângulo de tonalidade; MMb: metamioglobina; Mb⁺: deoximioglobina; O₂Mb: oximioglobina.

¹ Médias seguidas por diferentes letras minúsculas na linha diferem pelo teste F em nível de 5% de probabilidade.

² Médias seguidas por diferentes letras minúsculas na linha diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

³ Números em negrito indicam coeficientes de correlação entre os indicadores de cor e o tempo de maturação significativos pelo teste *t* de Student em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 6 Efeitos de tempo de maturação sobre luminosidade (*L**) e conteúdo relativo de oximioglobina (O₂Mb) dentro de cada raça (média ± erro padrão)

Indicador de cor	Raça	Tempo de Maturação ¹			
		0	7	14	21
<i>L</i> *	Angus	49,47 ± 0,28 ^a	49,66 ± 0,26 ^a	49,47 ± 0,35 ^a	49,82 ± 0,36 ^a
	Nelore	49,54 ± 0,32 ^b	50,04 ± 0,45 ^{ab}	50,68 ± 0,36 ^a	50,72 ± 0,37 ^a
O ₂ Mb (%)	Angus	58,75 ± 0,90 ^a	74,34 ± 0,99 ^b	75,92 ± 0,83 ^b	76,32 ± 0,48 ^b
	Nelore	54,24 ± 1,42 ^a	72,14 ± 1,96 ^b	75,38 ± 1,17 ^{bc}	76,42 ± 0,53 ^c

*L**: luminosidade; O₂Mb: oximioglobina.

¹ Médias seguidas por diferentes letras minúsculas na linha diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Na carne bovina *in natura*, a mioglobina pode ocorrer em uma das três formas químicas: deoximioglobina (Mb^+), oximioglobina (O_2Mb) ou metamioglobina (MMb). A interconversão entre essas três formas químicas do pigmento é possível e a forma dominante depende das condições da carne e do meio, determinando a cor final da carne (FAUSTMAN; CASSEN, 1990; MANCINI; HUNT, 2005; TROY; KERRY, 2010). A Mb^+ possui coloração vermelho púrpura e é responsável pela cor da carne logo após o corte ou armazenada a vácuo. A O_2Mb possui coloração vermelho brilhante, preferida pelo consumidor, e é formada após a exposição da Mb^+ ao oxigênio (*blooming*). A formação da O_2Mb a partir da oxigenação da Mb^+ determina a intensidade da cor vermelha brilhante inicial. Mb^+ e O_2Mb podem se oxidar a MMb, proporcionando uma coloração amarronzada à carne, que não é aceita pelos consumidores (BOAKYE; MITTAL, 1996; FAUSTMAN; CASSEN, 1990; JEREMIAH, 2001; JEREMIAH; GIBSON, 2001; MANCINI; HUNT, 2005; TROY; KERRY, 2010).

Segundo King et al. (2010), a genética tem substancial influência sobre a cor da carne, sendo que a sua estabilidade aparenta ser mais importante que a cor inicial. O aumento da O_2Mb com sete dias de maturação, em ambas as raças, e a diferença entre as raças podem ser explicados por uma redução na taxa de consumo de oxigênio (TCO) ao longo da maturação e por uma maior TCO na carne de Nelore. O consumo de oxigênio reduz o desenvolvimento da cor vermelha inicial e sua intensidade, pois diminui a oxigenação da mioglobina, mantendo-a como Mb^+ . A TCO está associada com a respiração residual *post mortem* da mitocôndria e se relaciona com a profundidade de penetração do oxigênio na superfície exposta do músculo (MANCINI; HUNT, 2005; MANCINI; RAMANATHAN, 2014; MCKENNA et al., 2005). O músculo como carne continua a respirar após o abate de modo que o oxigênio continua a ser consumido na cadeia de transporte de elétrons mitocondrial. Assim, há uma

competição entre esse sistema respiratório e a mioglobina pelo oxigênio atmosférico que se difunde para dentro da carne (LANARI; CASSENS, 1991). O resultado líquido da difusão e do consumo de oxigênio pela mitocôndria determina o gradiente de concentração de oxigênio do ar para o interior da carne (O'KEEFFE; HOOD, 1982).

Portanto, a carne recém abatida (24 horas *post mortem*) apresenta uma alta TCO, a qual provavelmente é maior em Nelore, o que resulta em uma menor penetração do oxigênio no interior da carne, fazendo com que a O₂Mb seja formada em uma pequena profundidade no tempo zero. O consumo de oxigênio diminuiu com o tempo de maturação em razão do esgotamento de substratos e coenzimas e da degradação das enzimas envolvidas na respiração mitocondrial (HOOD, 1980; MACDOUGALL, 1982; MADHAVI; CARPENTER, 1993; MANCINI; RAMANATHAN, 2014; O'KEEFFE; HOOD, 1982), favorecendo a penetração de oxigênio dentro da carne, o que justificaria a maior formação da O₂Mb nas amostras a partir do 7º dia de maturação. Isso é corroborado pelas ($P < 0,05$) altas correlações negativas da Mb⁺ com a O₂Mb ($r = -0,96$) e com o tempo ($r = -0,73$) e pela ($P < 0,05$) alta correlação positiva da O₂Mb com o tempo ($r = 0,74$) (Tabelas 5 e 7). A partir do 7º dia de maturação, houve uma pequena variação ($\pm 4\%$) nos níveis de O₂Mb e de Mb⁺ em relação à alteração ($\pm 16\%$) observada nesse primeiro período de tempo. Vitale et al. (2014) também observaram um aumento do teor de O₂Mb nos primeiros 5 dias de maturação a vácuo (4 °C) em músculos *Longissimus dorsi* bovinos.

O nível de MMb permaneceu ($P > 0,05$) constante ($\sim 16\%$) durante o tempo de maturação (correlação não significativa). A metamioglobina redutase, NADH dependente, reduz o Fe⁺³ a Fe⁺², transformando a MMb em Mb⁺, possibilitando a sua oxigenação à O₂Mb (MANCINI; HUNT, 2005; MANCINI; RAMANATHAN, 2014). A atividade da metamioglobina redutase (MRA) prolonga a estabilidade da cor vermelho brilhante da carne bovina (BEKHIT;

FAUSTMAN, 2005; MCKENNA et al., 2005; SEYFERT et al., 2006). Desse modo, a deterioração da cor da carne bovina durante o armazenamento refrigerado tem sido atribuída à perda de sua MRA, o que poderia causar um aumento da MMb em detrimento da O₂Mb (ABDALLAH; MARCHELLO; AHMAD, 1999; BEVILACQUA; ZARITZKY, 1985; MADHAVI; CARPENTER, 1993; MANCINI; RAMANATHAN, 2014).

Tabela 7 Correlação de *Pearson*¹ entre os indicadores de cor de carne

	pH	L*	a*	b*	C*	h*	MMb	Mb ⁺
L*	-0,12							
a*	-0,15	0,35						
b*	-0,18	0,56	0,96					
C*	-0,16	0,43	0,99	0,98				
h*	-0,12	0,83	0,10	0,38	0,20			
MMb	0,11	-0,52	0,22	0,05	0,16	-0,54		
Mb ⁺	0,18	-0,23	-0,79	-0,77	-0,79	-0,11	-0,28	
O ₂ Mb	-0,22	0,39	0,76	0,79	0,78	0,27	0,01	-0,96

pH: potencial hidrogeniônico; L*: luminosidade; a*: índice de vermelho; b*: índice de amarelo; C*: saturação; h*: ângulo de tonalidade; MMb: metamioglobina; Mb⁺: deoximioglobina; O₂Mb: oximioglobina.

¹ Números em negrito indicam correlações significativas pelo teste *t de Student* em nível de 5% de probabilidade.

No entanto, outros estudos verificaram um aumento da MRA (ECHEVARNE; RENERRE; LABAS, 1990; FELDHUSEN et al., 1995) ou não observaram alterações na MRA (LANARI; CASSENS, 1991) ao longo do armazenamento refrigerado da carne bovina. Essas diferenças podem ser oriundas do tipo de músculo analisado, pois a taxa de descoloração da carne é músculo-dependente (O'KEEFFE; HOOD, 1982; MCKENNA et al., 2005). Segundo McKenna et al. (2005), em bovinos, músculos *Semimembranosus* possuem menores valores de MRA e menor estabilidade que o músculo *Longissimus thoracis*. Além disso, há evidências de que a redução da MMb também pode ocorrer por via não enzimática, diretamente pela ação de cofatores

como NADH e NADPH (BEKHIT; FAUSTMAN, 2005; RENERRE; THEIX, 1990). Feldhusen et al. (1995) e Bekhit et al. (2003) sugeriram que a quantidade de NADH presente na carne tem maior participação na estabilidade da cor que a MRA. Desse modo, isso justificaria a manutenção da MMb ($P > 0,05$) durante o tempo de maturação, a fraca correlação negativa ($P < 0,05$) da MMb com a Mb⁺ ($r = -0,28$) e a ausência ($P > 0,05$) de correlação da MMb com a O₂Mb.

A luminosidade (L^*) foi ($P < 0,05$) afetada pela interação entre raça e tempo de maturação (Tabela 5). Os valores de L^* aumentaram ($P < 0,05$) até o 14º dia de maturação na carne de Nelore, enquanto que, na carne de Angus não houve ($P > 0,05$) alteração nos valores de L^* ao longo do tempo de maturação (Tabela 6). Contudo, a amplitude máxima de variação dos valores de L^* foi muito pequena (1,25).

A carne tende a se tornar mais pálida por causa da maturação, pois as alterações na estrutura e nos índices de refração podem proporcionar uma maior dispersão (*scattering*) e reflexão da luz (HUGHES et al., 2014). Por isso, pequeno aumento nos valores de L^* durante a maturação tem sido observado em alguns estudos (BOAKYE; MITTAL, 1996; HOU et al., 2014; LAGERSTEDT; LUNDSTRÖM; LINDAHL, 2011; VITALE et al., 2014). Alguns autores (FAUSTMAN; CASSEN, 1990; HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014) sugerem que isto ocorre por causa de uma maior quantidade de água livre no espaço intracelular em razão do aumento da capacidade de retenção de água (CRA) da carne com a maturação. A melhoria da CRA durante a maturação é atribuída à degradação de proteínas citoesqueléticas, responsáveis pelas ligações costaméricas entre as miofibrilas e destas com o sarcolema, proporcionando uma menor redução do diâmetro da fibra *post mortem* e, portanto, um maior espaço intracelular para acomodação das moléculas de água (HUFF-LONERGAN; LONERGAN, 2005; HUGHES et al., 2014; PEARCE et al., 2011).

O valor do índice de vermelho (a^*) do 14º dia de maturação foi ($P < 0,05$) maior que aquele do 7º dia de maturação, o qual foi superior ($P < 0,05$) ao valor de a^* do tempo 0. No entanto, o valor de a^* do 21º dia de maturação foi ($P > 0,05$) semelhante àqueles do 7º e do 14º dia de maturação. Por outro lado, o valor do índice de amarelo (b^*) dos três últimos tempos de maturação foi ($P < 0,05$) maior que aqueles do tempo zero (Tabela 5).

As alterações nos valores de a^* e b^* ocorrem, principalmente, por causa da maior oxigenação da mioglobina de Mb^+ para O_2Mb , que foi atribuída à redução da TCO durante a maturação (MANCINI; RAMANATHAN, 2014; O'KEEFFE; HOOD, 1982). Isso é corroborado pelas ($P < 0,05$) altas correlações negativas da Mb^+ com a^* e b^* ($r = -0,77$ a $-0,79$) e positivas entre O_2Mb e esses índices de cor ($r = 0,76$ a $0,79$). Além disso, a^* e b^* foram ($P < 0,05$) altamente correlacionados entre si ($r = 0,96$) e de maneira intermediária com o tempo ($r = 0,47$ e $0,45$), o que demonstra que esses índices de cor tiveram comportamentos semelhantes ao longo da maturação. O aumento nos valores de a^* e b^* do músculo *Longissimus dorsi* bovino com a maturação também foi observado em outros estudos (BOAKYE; MITTAL, 1996; HOU et al., 2014; VITALE et al., 2014;).

O valor da saturação (C^*) dos três últimos tempos de maturação foi ($P < 0,05$) maior que aqueles do tempo zero (Tabela 5). O valor de C^* representa a intensidade de cor e é um bom indicador da oxigenação da carne recém exposta ao ar (RAMOS; GOMIDE, 2007). Isso é coerente com as altas correlações ($P < 0,05$) negativa e positiva de C^* com, respectivamente, Mb^+ ($r = -0,79$) e O_2Mb ($r = 0,78$). Além disso, a saturação (C^*) apresentou aumento semelhante aos observados para os valores de a^* e de b^* em razão das altas correlações ($P < 0,05$) de C^* com esses índices de cor ($r > 0,98$) e de sua ($P < 0,05$) correlação intermediária com o tempo ($r = 0,47$). Por outro lado, o ângulo de tonalidade (h^*) não ($P > 0,05$) se alterou ao longo do tempo de maturação (Tabela 5). A

descoloração da carne leva, geralmente, a um aumento nos valores de h^* devido a sua sensibilidade na mensuração da estabilidade da cor de carnes (CHAN et al., 1996; RAMOS; GOMIDE, 2007). Isso é coerente com as correlações ($P < 0,05$) intermediária negativa e alta positiva de h^* com, respectivamente, MMb ($r = -0,54$) e L^* ($r = 0,83$) e com a ausência de variação nos níveis de MMb e a pequena variação observada em L^* com a maturação. Além disso, a correlação ($P < 0,05$) quase perfeita ($r = 0,96$) entre a^* e b^* também deve ter contribuído para a manutenção do valor de h^* ao longo do tempo de maturação. Isso confirma que, no presente estudo, as diferenças na cor da carne bovina com a maturação parecem ser oriundas apenas da sua capacidade de oxigenação (*blooming*).

4.3 Momentos de inércia

Os momentos de inércia da carne de Nelore foram ($P < 0,05$) maiores que os momentos de inércia da carne de Angus somente nas amostras desembaladas com o uso da linha central na construção da THSP (Tabela 8).

O tempo de maturação afetou ($P < 0,05$) todos os momentos de inércia (Tabela 8). De maneira geral, quando avaliados nas amostras embaladas, os momentos de inércia do tempo 0 foram ($P < 0,05$) menores que aqueles do tempo 7, os quais foram ($P < 0,05$) menores que os momentos de inércia do tempo 14, independente do uso da linha central ou de um conjunto de pontos aleatórios na construção da TSHP e do método de cálculo empregado (MI ou AVD e normalizações). Os momentos de inércia do tempo 21 foram ($P > 0,05$) semelhantes àqueles dos tempos 0 e 7 com a normalização de Arizaga, Trivi e Rabal (1999), enquanto que, sem normalização e com a normalização de Cardoso e Braga (2014), os momentos de inércia do tempo 21 foram semelhantes ($P > 0,05$) apenas àqueles do tempo 7.

Tabela 8 Efeitos da raça e do tempo de maturação sobre os momentos de inércia (média ± erro padrão)

Momento de Inércia	Raça ¹		Tempo de Maturação ²				P(F)			<i>r</i> ³ (tempo)
	Angus	Nelore	0	7	14	21	R	T	RxT	
AVD.A.L.E	1508 ± 60	1602 ± 64	1261 ± 51 ^c	1547 ± 76 ^b	1934 ± 100 ^a	1478 ± 79 ^{bc}	0,32 <0,0001	0,11		0,23
AVD.C.L.E	6,94 ± 0,20	7,20 ± 0,22	5,80 ± 0,21 ^c	7,09 ± 0,23 ^b	8,30 ± 0,31 ^a	7,08 ± 0,26 ^b	0,44 <0,0001	0,09		0,33
MI.SN.L.E	28770 ± 1667	31266 ± 1820	20116 ± 1349 ^c	29603 ± 1925 ^b	40828 ± 2903 ^a	29525 ± 2108 ^b	0,37 <0,0001	0,14		0,31
MI.A.L.E	28893 ± 2179	31798 ± 2248	19820 ± 1344 ^c	29285 ± 2454 ^b	44014 ± 4081 ^a	28263 ± 2528 ^{bc}	0,39 <0,0001	0,20		0,25
MI.C.L.E	90,61 ± 5,25	98,48 ± 5,73	63,36 ± 4,25 ^c	93,24 ± 6,06 ^b	128,59 ± 9,14 ^a	92,99 ± 6,64 ^b	0,37 <0,0001	0,14		0,31
AVD.A.P.E	1597 ± 57	1664 ± 61	1346 ± 47 ^c	1651 ± 65 ^b	1995 ± 101 ^a	1531 ± 70 ^{bc}	0,43 <0,0001	0,17		0,21
AVD.C.P.E	7,03 ± 0,19	7,25 ± 0,20	6,05 ± 0,18 ^c	7,16 ± 0,22 ^b	8,28 ± 0,30 ^a	7,06 ± 0,24 ^b	0,47 <0,0001	0,10		0,29
MI.SN.P.E	29453 ± 1579	31536 ± 1719	21534 ± 1204 ^c	30207 ± 1818 ^b	40780 ± 2803 ^a	29456 ± 1993 ^b	0,42 <0,0001	0,14		0,28
MI.A.P.E	30050 ± 2106	32191 ± 2196	20376 ± 1316 ^c	31456 ± 2346 ^b	44283 ± 4075 ^a	28368 ± 2216 ^{bc}	0,48 <0,0001	0,38		0,23
MI.C.P.E	92,76 ± 4,97	99,33 ± 5,41	67,82 ± 3,79 ^c	95,14 ± 5,73 ^b	128,44 ± 8,83 ^a	92,77 ± 6,28 ^b	0,42 <0,0001	0,14		0,28
AVD.A.L.D	1193 ± 32 ^b	1341 ± 40 ^a	1080 ± 34 ^b	1273 ± 41 ^a	1280 ± 57 ^a	1435 ± 59 ^a	0,01 <0,0001	0,21		0,39
AVD.C.L.D	5,89 ± 0,12 ^b	6,31 ± 0,14 ^a	5,28 ± 0,13 ^c	6,13 ± 0,13 ^b	6,27 ± 0,19 ^{ab}	6,72 ± 0,20 ^a	0,05 <0,0001	0,34		0,46
MI.SN.L.D	19635 ± 775 ^b	22793 ± 1099 ^a	16055 ± 778 ^c	21088 ± 888 ^b	22400 ± 1341 ^{ab}	25313 ± 1758 ^a	0,04 <0,0001	0,30		0,41
MI.A.L.D	15776 ± 725 ^b	19533 ± 1278 ^a	13086 ± 698 ^b	17530 ± 970 ^{ab}	18474 ± 1317 ^a	21528 ± 2220 ^a	0,03 0,0002	0,20		0,34
MI.C.L.D	61,84 ± 2,44 ^b	71,79 ± 3,46 ^a	50,57 ± 2,45 ^c	66,42 ± 2,80 ^b	70,55 ± 4,22 ^{ab}	79,73 ± 5,54 ^a	0,04 <0,0001	0,30		0,41
AVD.A.P.D	1336 ± 32	1428 ± 35	1221 ± 29 ^b	1391 ± 36 ^a	1397 ± 57 ^a	1519 ± 51 ^a	0,09 <0,0001	0,48		0,36
AVD.C.P.D	5,96 ± 0,11	6,31 ± 0,12	5,43 ± 0,11 ^b	6,18 ± 0,12 ^a	6,27 ± 0,18 ^a	6,66 ± 0,17 ^a	0,07 <0,0001	0,52		0,43
MI.SN.P.D	20238 ± 726	22773 ± 927	16967 ± 679 ^b	21634 ± 852 ^a	22511 ± 1246 ^a	24911 ± 1441 ^a	0,07 <0,0001	0,43		0,40
MI.A.P.D	17711 ± 736	20264 ± 1061	14678 ± 677 ^b	19004 ± 856 ^a	20183 ± 1397 ^a	22083 ± 1711 ^a	0,10 <0,0001	0,34		0,35
MI.C.P.D	63,65 ± 2,29	71,70 ± 2,92	53,38 ± 2,12 ^b	67,95 ± 2,71 ^a	70,90 ± 3,92 ^a	78,46 ± 4,54 ^a	0,07 <0,0001	0,45		0,40

R: raça; T: tempo de maturação; P(F): probabilidade do teste F; AVD: valor Absoluto de diferenças; MI: momento de inércia; SN: sem normalização; A: normalização proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999); C: normalização proposta por Cardoso e Braga (2014); L: TSHP da linha central horizontal; P: TSHP de pontos aleatórios; E: amostra embalada; D: amostra desemballada.

¹ Médias seguidas por diferentes letras minúsculas na linha diferem pelo teste F em nível de 5% de probabilidade.

² Médias seguidas por diferentes letras minúsculas na linha diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

³ Números em negrito indicam coeficientes de correlação entre os momentos de inércia e o tempo de maturação significativos pelo teste *t de Student* em nível de 5% de probabilidade.

Por outro lado, quando avaliados nas amostras desembaladas, os momentos de inércia do tempo 0 foram ($P < 0,05$) menores que aqueles dos demais tempos, com exceção do momento de inércia obtido nas amostras desembaladas com a THSP construída com o uso da linha central e a normalização proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999) (MI.A.L.D). Os valores dos momentos de inércia não diferiram ($P > 0,05$) entre os tempos 7, 14 e 21 para o valor absoluto de diferença obtido nas amostras desembaladas com a THSP construída com o uso da linha central e a normalização proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999) (AVD.A.L.D) e quando um conjunto de pontos aleatórios foi utilizado na construção da THSP, independente do método de cálculo empregado (MI ou AVD e normalizações). Para o valor absoluto de diferença obtido nas amostras desembaladas com a THSP construída com o uso da linha central e a normalização proposta por Cardoso e Braga (2014) (AVD.C.L.D) e os momentos de inércia obtidos nas amostras desembaladas com a THSP construída com o uso da linha central e sem normalização (MI.SN.L.D) ou com a normalização proposta por Cardoso e Braga (2014) (MI.C.L.D), os valores do tempo 7 foram ($P < 0,05$) menores que aqueles do tempo 21, com os valores do tempo 14 sendo iguais ($P > 0,05$) a ambos.

Esses comportamentos dos momentos de inércia, positiva e moderadamente correlacionados ($0,21 < r < 0,46$) com o tempo de maturação (Tabela 8), contrastam com os resultados de Amaral et al. (2013), que observaram uma redução dos momentos de inércia ao longo do tempo de maturação por meio de correlações negativas e intermediárias ($-0,80 < r < -0,63$).

Segundo Cardoso e Braga (2014), sua normalização apresenta melhor resposta para ambos os métodos de cálculo do momento de inércia (MI e AVD) quando comparada à normalização proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999). Isto foi observado no presente estudo pelos maiores níveis de distinção entre os

tempos de maturação com o uso da normalização proposta por Cardoso e Braga (2014).

Os momentos de inércia das amostras embaladas foram ($P < 0,05$) positivamente e altamente correlacionados entre si ($r > 0,91$) (Tabela 9). Os momentos de inércia das amostras desembaladas também foram ($P < 0,05$) positivamente e altamente correlacionados entre si ($r > 0,89$) (Tabela 10). Isso indica que o uso da linha central ou de um conjunto de pontos aleatórios na construção da TSHP e que os diferentes métodos de cálculo (MI/AVD e normalizações) dos momentos de inércia não alteram o seu comportamento.

As correlações entre os momentos de inércia das amostras embaladas e os momentos de inércia das amostras desembaladas foram ($P < 0,05$) positivas e fracas ($r < 0,40$) (Tabela 11). A embalagem plástica e o exsudado, que se localiza entre ela e a superfície da carne, possivelmente, interferem no espalhamento (*scattering*) da luz (RAMOS; GOMIDE, 2007) e, logo, afetam as imagens do *Biospeckle laser* e os momentos de inércia calculados (AMARAL et al., 2013). Isso também pode ser verificado pelos valores ligeiramente superiores das médias e dos erros padrões dos momentos de inércia das amostras embaladas em relação às desembaladas. Além dos métodos de cálculo, isso também pode ter contribuído para os diferentes níveis de distinção dos momentos de inércia entre as raças e os tempos de maturação observados nesse estudo.

Tabela 9 Correlação de *Pearson*¹ entre os momentos de inércia das amostras embaladas

	AVD.A.L.E	AVD.C.L.E	MI.WN.L.E	MI.A.L.E	MI.C.L.E	AVD.A.P.E	AVD.C.P.E	MI.WN.P.E	MI.A.P.E
AVD.C.L.E	0,96								
MI.WN.L.E	0,97	0,99							
MI.A.L.E	0,97	0,92	0,96						
MI.C.L.E	0,97	0,99	1,00	0,96					
AVD.A.P.E	0,97	0,95	0,96	0,94	0,96				
AVD.C.P.E	0,97	0,99	0,98	0,93	0,98	0,97			
MI.WN.P.E	0,97	0,97	0,99	0,96	0,99	0,98	0,99		
MI.A.P.E	0,94	0,91	0,94	0,95	0,94	0,96	0,93	0,96	
MI.C.P.E	0,97	0,97	0,99	0,96	0,99	0,98	0,99	1,00	0,96

AVD: valor Absoluto de diferenças; MI: momento de inércia; SN: sem normalização; A: normalização proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999); C: normalização proposta por Cardoso e Braga (2014); L: TSHP da linha central horizontal; P: TSHP de pontos aleatórios; E: amostra embalada; D: amostra desembalada.

¹ Números em negrito indicam coeficientes significativos pelo teste *t de Student* em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 10 Correlação de *Pearson*¹ entre os momentos de inércia das amostras desembaladas

	AVD.A.L.D	AVD.C.L.D	MI.WN.L.D	MI.A.L.D	MI.C.L.D	AVD.A.P.D	AVD.C.P.D	MI.WN.P.D	MI.A.P.D
AVD.C.L.D	0,96								
MI.WN.L.D	0,96	0,98							
MI.A.L.D	0,94	0,91	0,97						
MI.C.L.D	0,96	0,98	1,00	0,97					
AVD.A.P.D	0,95	0,95	0,94	0,89	0,94				
AVD.C.P.D	0,95	0,99	0,96	0,89	0,96	0,96			
MI.WN.P.D	0,95	0,98	0,99	0,94	0,99	0,96	0,98		
MI.A.P.D	0,93	0,94	0,98	0,96	0,98	0,95	0,94	0,98	
MI.C.P.D	0,95	0,98	0,99	0,94	0,99	0,96	0,98	1,00	0,98

AVD: valor Absoluto de diferenças; MI: momento de inércia; SN: sem normalização; A: normalização proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999); C: normalização proposta por Cardoso e Braga (2014); L: TSHP da linha central horizontal; P: TSHP de pontos aleatórios; E: amostra embalada; D: amostra desembalada.

¹ Números em negrito indicam coeficientes significativos pelo teste *t de Student* em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 11 Correlação de *Pearson*¹ dos momentos de inércia das amostras embaladas com os momentos de inércia das amostras desembradas

	AVD.A.L.E	AVD.C.L.E	MI.WN.L.E	MI.A.L.E	MI.C.L.E	AVD.A.P.E	AVD.C.P.E	MI.WN.P.E	MI.A.P.E	MI.C.P.E
AVD.A.L.D	0,27	0,34	0,33	0,26	0,33	0,24	0,30	0,29	0,26	0,29
AVD.C.L.D	0,32	0,40	0,39	0,31	0,39	0,27	0,35	0,34	0,30	0,34
MI.WN.L.D	0,31	0,39	0,38	0,31	0,38	0,27	0,34	0,33	0,30	0,33
MI.A.L.D	0,29	0,36	0,35	0,29	0,35	0,25	0,31	0,30	0,28	0,30
MI.C.L.D	0,31	0,39	0,38	0,31	0,38	0,27	0,34	0,33	0,30	0,33
AVD.A.P.D	0,27	0,32	0,32	0,27	0,32	0,23	0,28	0,28	0,26	0,28
AVD.C.P.D	0,33	0,40	0,38	0,32	0,38	0,29	0,35	0,34	0,32	0,34
MI.WN.P.D	0,33	0,39	0,39	0,33	0,39	0,29	0,35	0,35	0,33	0,35
MI.A.P.D	0,32	0,37	0,38	0,33	0,38	0,28	0,34	0,34	0,32	0,34
MI.C.P.D	0,33	0,40	0,39	0,34	0,39	0,29	0,36	0,35	0,33	0,35

AVD: valor Absoluto de diferenças; MI: momento de inércia; SN: sem normalização; A: normalização proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999); C: normalização proposta por Cardoso e Braga (2014); L: TSHP da linha central horizontal; P: TSHP de pontos aleatórios; E: amostra embalada; D: amostra desembrada.

¹ Números em negrito indicam coeficientes significativos pelo teste *t de Student* em nível de 5% de probabilidade.

No estudo de Amaral et al. (2013), também podem ser observados valores ligeiramente maiores para as médias e os desvios-padrão dos momentos de inércia das amostras embaladas em relação às desembaladas.

4.4 Momentos de inércia e indicadores de qualidade

Os momentos de inércia não ($P > 0,05$) se correlacionaram com a CRA e o CS da carne bovina (Tabela 12). Contudo, isso é interessante, pois indica que o *Biospeckle laser* não está associado com a forma como a água permanece retida na carne e com estado de contração da estrutura miofibrilar, que também foi mensurado por meio do uso (da difração) de um laser. Os momentos de inércia se correlacionaram ($P < 0,05$) com os demais indicadores de qualidade da carne bovina (Tabelas 12 e 13), à exceção ($P > 0,05$) de alguns coeficientes de correlação de determinados momentos de inércia, mensurados nas amostras desembaladas, com a^* , h^* e MMb (Tabela 13).

Tabela 12 Correlação de *Pearson*¹ dos momentos de inércia com os indicadores de qualidade de carne

	pH	Purga	CRA	PPC	FC	CS	IFM
AVD.A.L.E	-0,39	0,40	-0,02	0,34	-0,24	-0,06	0,34
AVD.C.L.E	-0,39	0,46	-0,01	0,40	-0,32	-0,03	0,39
MI.WN.L.E	-0,38	0,45	-0,01	0,38	-0,30	-0,05	0,38
MI.A.L.E	-0,36	0,42	-0,04	0,33	-0,26	-0,07	0,35
MI.C.L.E	-0,38	0,45	-0,01	0,38	-0,30	-0,05	0,38
AVD.A.P.E	-0,34	0,38	0,00	0,32	-0,24	-0,07	0,35
AVD.C.P.E	-0,38	0,44	0,00	0,38	-0,30	-0,05	0,40
MI.WN.P.E	-0,38	0,45	0,00	0,37	-0,30	-0,07	0,39
MI.A.P.E	-0,33	0,40	-0,01	0,32	-0,29	-0,09	0,37
MI.C.P.E	-0,38	0,45	0,00	0,37	-0,30	-0,07	0,39
AVD.A.L.D	-0,42	0,33	0,01	0,28	-0,20	-0,07	0,17
AVD.C.L.D	-0,42	0,38	0,00	0,31	-0,30	-0,06	0,22
MI.WN.L.D	-0,41	0,35	-0,04	0,27	-0,26	-0,05	0,21
MI.A.L.D	-0,38	0,29	-0,09	0,24	-0,19	-0,05	0,20
MI.C.L.D	-0,41	0,35	-0,04	0,27	-0,26	-0,05	0,21
AVD.A.P.D	-0,39	0,31	0,05	0,23	-0,21	-0,04	0,17
AVD.C.P.D	-0,42	0,35	0,01	0,28	-0,29	-0,05	0,20
MI.WN.P.D	-0,41	0,33	-0,02	0,25	-0,26	-0,04	0,20
MI.A.P.D	-0,40	0,31	-0,05	0,23	-0,22	-0,03	0,21
MI.C.P.D	-0,41	0,33	-0,02	0,25	-0,26	-0,04	0,21

AVD: valor Absoluto de diferenças; MI: momento de inércia; SN: sem normalização; A: normalização proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999); C: normalização proposta por Cardoso e Braga (2014); L: TSHP da linha central horizontal; P: TSHP de pontos aleatórios; E: amostra embalada; D: amostra desembalada; pH: potencial hidrogeniônico; CRA: capacidade de retenção de água; PPC: perda de peso por cozimento; FC: força de cisalhamento; CS: comprimento de sarcômero; IFM: índice de fragmentação miofibrilar.

¹ Números em negrito indicam coeficientes significativos pelo teste *t de Student* em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 13 Correlação de *Pearson*¹ entre os momentos de inércia e os indicadores de cor de carne

	pH	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>C</i> *	<i>h</i> *	MMb	Mb ⁺	O ₂ Mb
AVD.A.L.E	-0,39	0,47	0,24	0,33	0,28	0,37	-0,36	-0,28	0,39
AVD.C.L.E	-0,39	0,50	0,30	0,39	0,34	0,39	-0,39	-0,35	0,47
MI.WN.L.E	-0,38	0,49	0,29	0,38	0,33	0,38	-0,35	-0,35	0,46
MI.A.L.E	-0,36	0,46	0,27	0,36	0,30	0,35	-0,31	-0,31	0,41
MI.C.L.E	-0,38	0,49	0,29	0,38	0,33	0,38	-0,35	-0,35	0,46
AVD.A.P.E	-0,34	0,45	0,22	0,31	0,26	0,35	-0,34	-0,28	0,39
AVD.C.P.E	-0,38	0,50	0,27	0,37	0,31	0,40	-0,39	-0,33	0,45
MI.WN.P.E	-0,38	0,50	0,27	0,37	0,31	0,39	-0,35	-0,33	0,45
MI.A.P.E	-0,33	0,43	0,25	0,33	0,28	0,31	-0,28	-0,30	0,40
MI.C.P.E	-0,38	0,50	0,27	0,37	0,31	0,39	-0,35	-0,33	0,45
AVD.A.L.D	-0,42	0,28	0,16	0,20	0,17	0,16	-0,13	-0,27	0,32
AVD.C.L.D	-0,42	0,31	0,25	0,29	0,27	0,19	-0,16	-0,35	0,41
MI.WN.L.D	-0,41	0,32	0,22	0,27	0,24	0,22	-0,15	-0,31	0,37
MI.A.L.D	-0,38	0,32	0,16	0,22	0,19	0,22	-0,14	-0,25	0,30
MI.C.L.D	-0,41	0,32	0,22	0,27	0,24	0,22	-0,15	-0,31	0,37
AVD.A.P.D	-0,39	0,26	0,17	0,20	0,18	0,16	-0,14	-0,27	0,32
AVD.C.P.D	-0,42	0,30	0,23	0,27	0,25	0,17	-0,17	-0,33	0,40
MI.WN.P.D	-0,41	0,32	0,21	0,26	0,23	0,21	-0,17	-0,31	0,37
MI.A.P.D	-0,40	0,31	0,19	0,24	0,21	0,21	-0,16	-0,27	0,32
MI.C.P.D	-0,41	0,32	0,21	0,26	0,23	0,21	-0,17	-0,31	0,37

AVD: valor Absoluto de diferenças; MI: momento de inércia; SN: sem normalização; A: normalização proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999); C: normalização proposta por Cardoso e Braga (2014); L: TSHP da linha central horizontal; P: TSHP de pontos aleatórios; E: amostra embalada; D: amostra desembalada; pH: potencial hidrogeniônico; *L**: luminosidade; *a**: índice de vermelho; *b**: índice de amarelo; *C**: saturação; *h**: ângulo de tonalidade; MMb: metamioglobina; Mb⁺: deoximioglobina; O₂Mb: oximioglobina.

¹ Números em negrito indicam correlações significativas pelo teste *t de Student* em nível de 5% de probabilidade.

Os momentos de inércia ($P < 0,05$) se correlacionaram positivamente com a purga, a PPC, o IFM, a O_2Mb e todas as coordenadas de cor (L^* , a^* , b^* , C^* e h^*) da carne bovina, e negativamente com o pH, a FC, a MMb e a Mb^+ (Tabelas 12 e 13). À exceção do pH, os momentos de inércia das amostras embaladas sem normalização ou com a normalização proposta por Cardoso e Braga (2014), independente do método de cálculo (MI ou AVD) e do uso da linha central ou de um conjunto de pontos aleatórios na construção da TSHP, apresentaram coeficientes de correlação com esses indicadores de qualidade da carne bovina ligeiramente superiores aos demais, com destaque para o AVD.C.L.E. No entanto, todos os coeficientes de correlação entre os momentos de inércia e esses indicadores de qualidade de carnes foram moderados ($-0,42 < r < 0,50$), *i.e.*, os momentos de inércia explicaram apenas uma pequena parcela da variação da qualidade da carne bovina.

Em relação à maciez da carne bovina, as correlações negativas e fracas ($-0,32 < r < -0,19$) entre os momentos de inércia e a FC contrastam com os resultados observados por Amaral et al. (2013). De modo geral, estes autores observaram coeficientes de correlação positivos e intermediários ($0,45 < r < 0,61$), *i.e.*, diminuição dos momentos de inércia com a redução da FC da carne bovina.

Em relação à cor da carne bovina, momentos de inércia correlacionados positivamente com a^* e O_2Mb , e negativamente com MMb também foram relatados por Amaral et al. (2013). No entanto, estes autores observaram maiores magnitudes para os coeficientes que o presente estudo (a^* : $r = 0,68$ a $0,81$; O_2Mb : $r = 0,54$ a $0,71$; MMb : $r = -0,77$ a $-0,91$). Além das menores magnitudes que a observada por Amaral et al. (2013), para os coeficientes de correlação dos momentos de inércia com b^* ($r = -0,37$ a $-0,54$), h^* ($r = -0,60$ a $-0,80$) e Mb^+ ($r = 0,28$ a $0,50$), no presente estudo, houve uma alteração no sentido da correlações. Por outro lado, os coeficientes de correlações dos momentos de

inércia com L^* e C^* apresentaram as mesmas magnitudes nesse estudo que aquelas relatadas por Amaral et al. (2013), porém também houve alteração no sentido das correlações.

Desse modo, os resultados obtidos nesse estudo com o uso da configuração experimental do *Biospeckle laser* adaptada para o uso em laboratório de análise de qualidade de carnes não corroboraram os resultados encontrados por Amaral et al. (2013) com o uso do *Biospeckle laser* em um laboratório de ótica. Estes autores sugerem que esta técnica tem potencial para fornecer informações sobre características físico-químicas responsáveis pelo amaciamento da carne embalada e para prever h^* e MMb , sem a necessidade de remover a carne da embalagem e a expor ao ar. Portanto, um maior desenvolvimento dessa técnica é necessário para permitir a mensuração *online*, rápida, não destrutiva e de baixo custo da qualidade da carne bovina, ainda no frigorífico.

Possíveis explicações para as diferenças observadas entre os resultados do presente estudo e de Amaral et al. (2013) podem ser atribuídas ao tipo de carne utilizada e a configuração experimental (tipo de *laser*, adaptação fora do laboratório de ótica e as características dos grãos do *speckle*).

Esses autores adquiriram suas amostras de carne bovina em uma indústria frigorífica, sem as mesmas informações disponíveis nesse estudo como a idade, a raça, a dieta e sobre o abate dos animais, bem como do tempo *post mortem* de início do processo de maturação, que é crítico, para as amostras de carne. No presente experimento, todas as amostras foram preparadas (cortadas em tamanho padrão e embaladas a vácuo) e submetidas ao processo de maturação após 24 horas *post mortem*. Isso é importante, pois a atividade das enzimas responsáveis pelo amaciamento da carne ocorre até as primeiras 24 a 48 horas *post mortem* (KEMP et al., 2010; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; NOWAK, 2011). O que pode ser

observado sobre essa diferença nos resultados do *Biospeckle laser*, particularmente relacionado ao tipo de amostra de carne bovina utilizada, é que a análise de Amaral et al. (2013) pode ter observado um fenômeno diferente, e, portanto, mais estável, pois provavelmente iniciou o seu processo de maturação em um tempo *post mortem* posterior.

De maneira complementar, a configuração experimental do presente estudo proporcionou um menor tamanho de grão de *speckle* que aquele obtido por Amaral et al. (2013) (Figura 8). Essa diferença no tamanho do grão do *speckle* pode influenciar os resultados do *Biospeckle laser*, principalmente, somado à hipótese apresentada anteriormente relacionada à maior atividade presente em razão de um tempo *post mortem* mais precoce. Essa maior atividade somada ao menor tamanho do grão de *speckle* pode ter proporcionado valores mais aleatórios e de alta frequência aos resultados. A observação da Figura 8 também permite uma análise do tamanho dos grãos por meio de uma binarização de 30 a 65 níveis de cinza, corroborando que as imagens são realmente diferentes. A análise da distribuição nos histogramas para as imagens binarizadas também permite verificar que, com esses limites, o número de partículas pequenas ocorre com mais frequência na configuração experimental do presente estudo.

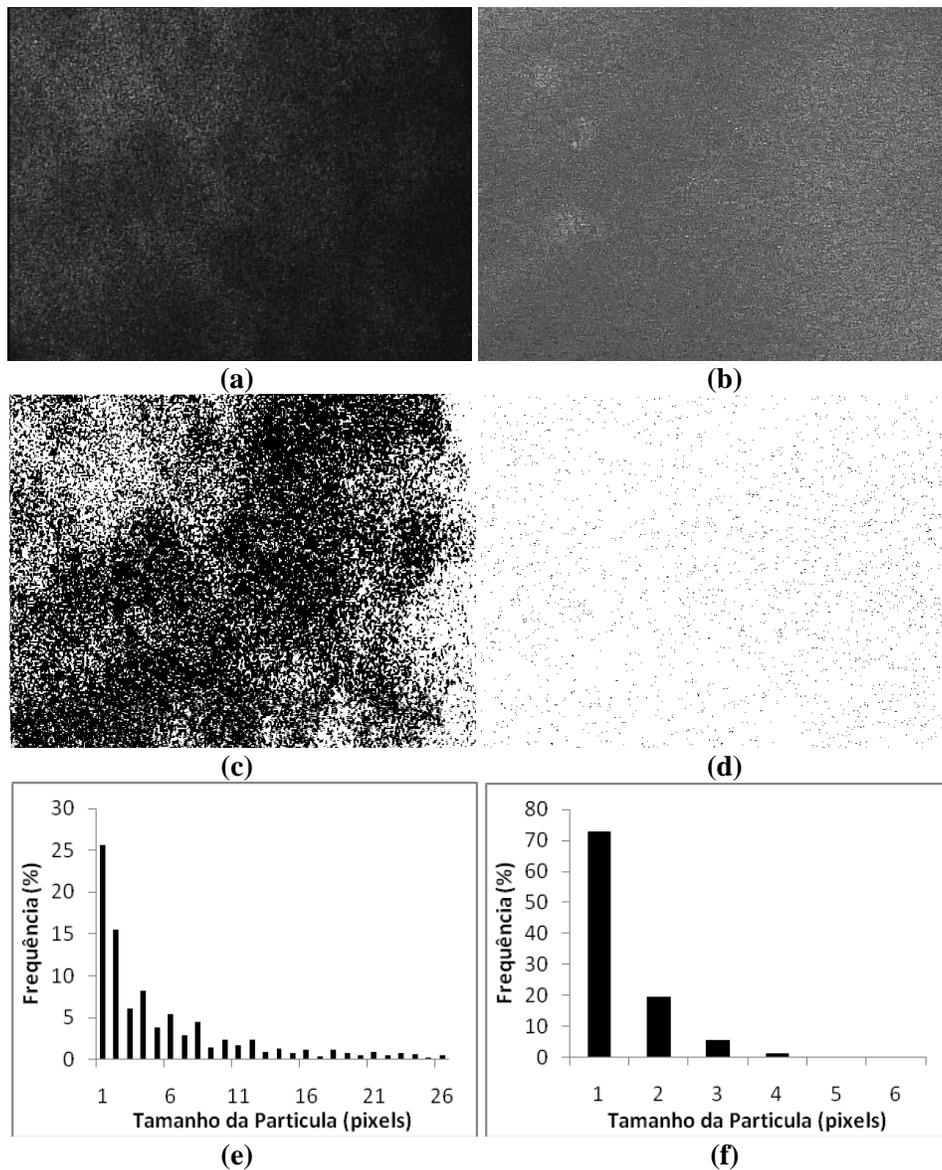


Figura 8 *Speckle* capturado por (a) Amaral et al. (2013) e no (b) presente experimento. Binarização com 30 - 65 (c) da imagem (a) e (d) da imagem (b). Histograma de distribuição de frequência do tamanho das partículas (e)¹ da imagem (c) e (f) da imagem (d).

¹ Tamanhos de partícula superiores a 27 (9,5% dos dados) foram omitidos do histograma (e).

Uma diferença adicional na configuração experimental, que também deve ser considerada como possível causa dessa diferença nos resultados do *Biospeckle laser*, é o tipo de laser adotado. Amaral et al. (2013) usaram um *laser* de HeNe, enquanto que, no presente estudo, foi empregado um *laser* de estado sólido de diodo, que pode ser afetado por um fenômeno denominado *mode hopping* e, logo, influenciar os resultados obtidos. Ohtsu, Otsuka e Teramachi (1985) constataram que as flutuações em *lasers* de semicondutores estavam sendo detectadas empiricamente e observaram, por meio de simulações, que o *mode hopping* tem uma origem espontânea. Ahmed (2003) defendeu que em um *laser* de semicondutor podem ser observados dois fenômenos, o *jittering* e o *mode hopping*, e que esse último poderia causar um violento aumento das flutuações, afetando a saída total do laser. Ahmed, Yamada e Abdulrhmann (2001) já tinham defendido que o *mode hopping* poderia ser causado por uma competição de modos que estava relacionada a um efeito de saturação de ganho não linear. Desse modo, é importante avaliar se o *mode hopping* pode ocorrer nas configurações experimentais do *Biospeckle laser* e qual o seu comprometimento nos resultados obtidos. Afinal, isso poderia inviabilizar muitos desenvolvimentos de equipamentos envolvendo o *laser* de semicondutor.

O uso de uma análise de frequência poderia ser uma opção para tentar melhorar os resultados do *Biospeckle laser* para a predição das características físico-químicas relacionadas à qualidade da carne bovina durante o processo de maturação. O nível de atividade pode ter diversas origens quando a superfície da carne é iluminada pelo *Biospeckle laser*, tais como movimentação e evaporação da água, respiração, atividade enzimática, reações químicas, *blooming*, nível de fragmentação da estrutura miofibrilar, variação de temperatura, etc.

Os métodos usados para analisar a atividade biológica com o *Biospeckle laser* se baseiam no somatório de várias contribuições relativas de uma ampla variedade de fenômenos. Desse modo, essa abordagem não consegue isolar uma

característica particular. A vantagem da transformação de *wavelet*, associada com o momento de inércia, é a sua capacidade para identificar e representar uma atividade isolada pela filtragem somente do sinal (faixa de frequência) desejado, que fornece melhores informações apenas do fenômeno biológico em estudo como, por exemplo, da atividade de calpaína (ALVES; BRAGA; VILAS BOAS, 2013; BRAGA et al., 2007; CARDOSO et al., 2011; SENDRA et al., 2005).

As pesquisas com imagens hiperespectrais e espectroscopias do infravermelho próximo e da região visível têm se destacado entre as tecnologias emergentes estudadas para a avaliação da qualidade de carnes. Entretanto, observa-se uma ampla variação nos resultados obtidos (PRIETO et al., 2009a; XIONG et al., 2014). A aplicação de imagens hiperespectrais para a classificação da carne bovina em categorias de maciez obteve de 80% (CLUFF et al., 2013) a 96% (NAGANATHAN et al., 2008) de acerto. Além disso, os coeficientes de determinação (R^2) das equações da FC em função de parâmetros hiperespectrais variaram entre 0,67 (CLUFF et al., 2008) e 0,83 (ELMASRY; SUN; ALLEN, 2012; WU et al., 2012). O uso de imagens hiperespectrais para a avaliação das coordenadas de cor (L^* , a^* e b^*) apresentaram equações com R^2 variando entre 0,77 (WU et al., 2010) e 0,94 (WU et al., 2012).

As espectroscopias do infravermelho próximo e da região visível proporcionaram resultados ainda mais variados. As regressões da FC em função de alguns parâmetros de determinados comprimentos de onda apresentaram coeficientes de determinação (R^2) entre 0,08 (LEROY et al., 2003; MARCHI et al., 2013; RØDBOTTEN; NILSEN; HILDRUM, 2000) e 0,74 (LIU et al., 2003; RIPOLL et al., 2008). Já as regressões de L^* , a^* e b^* , em função de alguns parâmetros de determinados comprimentos de onda, apresentaram coeficientes de determinação (R^2) variando de, respectivamente, 0,41 (MARCHI et al., 2013), 0,008 (PRIETO et al., 2008) e 0,17 (MARCHI et al., 2013) até 0,87 (PRIETO et al., 2008), 0,90 (LIU et al., 2003) e 0,91 (PRIETO et al., 2009b).

5 CONCLUSÃO

A carne de Angus possui maior retenção de água e menor maciez que a carne de Nelore. A maturação proporciona menor retenção de água e maior maciez na carne bovina em razão do aumento do nível de proteólise. Após sete dias de maturação, há uma melhoria na cor vermelha brilhante da carne bovina.

Os momentos de inércia da carne de Nelore são maiores que aqueles da carne de Angus apenas nas amostras desembaladas em que a história temporal do padrão do speckle (THSP) foi construída com a linha central das imagens. O tempo de maturação também afeta os valores dos momentos de inércia.

Com o uso da configuração experimental do *Biospeckle laser* adaptada para o uso em laboratório de análise de qualidade de carnes, associado à análise do momento de inércia, não alcançou o potencial técnico pretendido na predição das características físico-químicas relacionadas à qualidade da carne bovina durante o processo de maturação. Portanto, mais estudos nessa linha de pesquisa são necessários para o desenvolvimento da técnica *Biospeckle laser* na área de qualidade de carnes a fim de que possa ser aplicada na indústria frigorífica.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASLYNG, M. D. et al. Cooking loss and juiciness of pork in relation to raw meat quality and cooking procedure. **Food Quality and Preference**, Barking, v. 14, n. 4, p. 277-288, June 2003.

AASLYNG, M. D. Measuring quality indicators for raw meat. In: KERRY, J. P.; KERRY, J. F.; LEDWARD, D. (Ed.). **Meat processing: improving quality**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002. p. 157-174.

ABDALLAH, M. B.; MARCHELLO, J. A.; AHMAD, H. A. Effect of freezing and microbial growth on myoglobin derivatives of beef. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 47, n. 10, p. 4093-4099, Oct. 1999.

ACEBRÓN, L. B.; DOPICO, D. C. The importance of intrinsic and extrinsic cues to expected and experienced quality: an empirical application for beef. **Food Quality and Preference**, Barking, v. 11, n. 3, p. 229-238, May 2000.

AHMED, M. Numerical characterization of intensity and frequency fluctuations associated with mode hopping and single-mode jittering in semiconductor lasers. **Physica. D, Nonlinear Phenomena**, Amsterdam, v. 176, n. 3-4, p. 212-236, Mar. 2003.

AHMED, M.; YAMADA, M.; ABDULRHMAN, S. A multimode simulation model of mode-competition low-frequency noise in semiconductor lasers. **Fluctuation and Noise Letters**, Washington, v. 1, n. 3, p. 163-170, Sept. 2001.

AHNSTRÖM, M. L.; HUNT, M. C.; LUNDSTRÖM, K. Effects of pelvic suspension of beef carcasses on quality and physical traits of five muscles from four gender-age groups. **Meat Science**, Barking, v. 90, n. 3, p. 528-535, Mar. 2012.

ALVES, J. A.; BRAGA, R. A.; VILAS BOAS, E. V. D. B. Identification of respiration rate and water activity change in fresh-cut carrots using biospeckle laser and frequency approach. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v. 86, p. 381-386, Dec. 2013.

AMARAL, I. C. et al. Application of biospeckle laser technique for determining biological phenomena related to beef aging. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 119, n. 1, p. 135-139, Nov. 2013.

AMERICAN MEAT SCIENCE ASSOCIATION. **Research guidelines for cookery, sensory evaluation and instrumental tenderness measurements of fresh meat**. Chicago: AMSA, 1995. 47 p.

ANDRÉS, S. et al. The use of visible and near infrared reflectance spectroscopy to predict beef *M. longissimus thoracis et lumborum* quality attributes. **Meat Science**, Barking, v. 78, n. 3, p. 217-224, Mar. 2008.

ARIZAGA, R. et al. Display of local activity using dynamical speckle patterns. **Optical Engineering**, Redondo Beach, v. 41, n. 2, p. 287-294, Feb. 2002.

ARIZAGA, R.; RABAL, H. J.; TRIVI, M. Detection of fungi in beans by the laser biospeckle technique. **Biosystems Engineering**, London, v. 91, n. 4, p. 465-469, Aug. 2005.

ARIZAGA, R.; TRIVI, M.; RABAL, H. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. **Optics and Laser Technology**, Surrey, v. 31, n. 2, p. 163-169, Mar. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORES DE CARNE. **Rebanho bovino brasileiro**. São Paulo: ABIEC, 2014. Disponível em: <<http://www.abiec.com.br>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

BEKHIT, A. E. D. et al. The effects of natural antioxidants on oxidative processes and metmyoglobin reducing activity in beef patties. **Food Chemistry**, London, v. 81, n. 2, p. 175-187, May 2003.

BEKHIT, A. E. D.; FAUSTMAN, C. Metmyoglobin reducing activity. **Meat Science**, Barking, v. 71, n. 3, p. 407-439, Nov. 2005.

BERTRAM, H. C. et al. Physical changes of significance for early post mortem water distribution in porcine *M. longissimus*. **Meat Science**, Barking, v. 66, n. 4, p. 915-924, Apr. 2004.

BEVILACQUA, A. E.; ZARITZKY, N. E. Rate of pigment modifications in packaged refrigerated beef using reflectance spectrophotometry. **Journal of Food Processing and Preservation**, Westport, v. 10, n. 1, p. 1-18, Mar. 1985.

BOAKYE, K.; MITTAL, G. S. Changes in colour of beef *M. longissimus dorsi* muscle during ageing. **Meat Science**, Barking, v. 42, n. 3, p. 347-354, Mar. 1996.

BOAKYE, K.; MITTAL, G. S. Changes in pH and water holding properties of Longissimus dorsi muscle during beef ageing. **Meat Science**, Barking, v. 34, n. 3, p. 335-349, 1993.

BOLEMAN, S. J. et al. Consumer evaluation of beef of known categories of tenderness. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 75, n. 6, p. 1521-1524, June 1997.

BOUTON, P. E. et al. A comparison of the effects of some post-slaughter treatments on the tenderness of beef. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, v. 8, n. 1, p. 39-49, Mar. 1973.

BOWLING, M. B. et al. Using reflectance spectroscopy to predict beef tenderness. **Meat Science**, Barking, v. 82, n. 1, p. 1-5, May 2009.

BRAGA, R. A. et al. Assessment of seed viability by laser speckle techniques. **Biosystems Engineering**, London, v. 86, n. 3, p. 287-294, Nov. 2003.

BRAGA, R. A. et al. Biological feature isolation by wavelets in biospeckle laser images. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 58, n. 2, p. 123-132, Sept. 2007.

BRAGA, R. A. et al. Biospeckle numerical values over spectral image maps of activity. **Optics Communications**, Amsterdam, v. 285, n. 5, p.553-561, Mar. 2012.

BRAGA, R. A. et al. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences. **Optics Communications**, Amsterdam, v. 284, n. 2, p. 646–650, Jan. 2011.

BRAGA, R. A. et al. Live biospeckle laser imaging of root tissues. **European Biophysics Journal**, New York, v. 38, n. 5, p. 679-686, June 2009.

BRAY, R. C. et al. Endoscopic laser speckle imaging of tissue blood flow: applications in the human knee. **Journal of Orthopaedic Research**, New York, v. 24, n. 8, p. 1650-1659, Aug. 2006.

BRESSAN, M. C. et al. Physicochemical properties of meat from *Bos taurus* and *Bos indicus*. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 6, p. 1250-1259, June 2011.

BREWER, S.; NOVAKOFSKI, J. Consumer sensory evaluations of aging effects on beef quality. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 73, n. 1, p. 78-82, Jan. 2008.

BYRNE, C. E. et al. Non-destructive prediction of selected quality attributes of beef by near-infrared reflectance spectroscopy between 750 and 1098 nm. **Meat Science**, Barking, v. 49, n. 4, p. 399-409, Aug. 1998.

CARDOSO, R. R. et al. Frequency signature of water activity by biospeckle laser. **Optics Communications**, Amsterdam, v. 284, n. 8, p. 2131-2136, Apr. 2011.

CARDOSO, R. R.; BRAGA, R. A. Enhancement of the robustness on dynamic speckle laser numerical analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 63, p. 19-24, Dec. 2014.

CARPENTER, C. E.; CORNFORTH, D. P.; WHITTIER, D. Consumer preferences for beef color and packaging did not affect eating satisfaction. **Meat Science**, Barking, v. 57, n. 4, p. 359-363, Apr. 2001.

CARVALHO, P. H. A. et al. Motility parameters assessment of bovine frozen semen by biospeckle laser (BSL) system. **Biosystems Engineering**, London, v. 102, n. 1, p. 31-35, Jan. 2009.

CHAMBAZ, A. et al. Meat quality of Angus, Simmental, Charolais and Limousin steers compared at the same intramuscular fat content. **Meat Science**, Barking, v. 63, n. 4, p. 491-500, Apr. 2003.

CHAN, W. K. M. et al. Dietary vitamin E effect on color stability and sensory assessment of spoilage in three beef muscles. **Meat Science**, Barking, v. 42, n. 4, p. 387-399, Apr. 1996.

CHENG, H. et al. Efficient characterization of regional mesenteric blood flow by use of laser speckle imaging. **Applied Optics**, New York, v. 42, n. 28, p. 5759-5764, Oct. 2003.

CHRIKI, S. et al. Cluster analysis application identifies muscle characteristics of importance for beef tenderness. **BMC Biochemistry**, Washington, v. 13, p. 29, Dec. 2012.

CLUFF, K. et al. Optical scattering in beef steak to predict tenderness using hyperspectral imaging in the VIS-NIR region. **Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety**, Oxford, v. 2, n. 3, p. 189-196, Sept. 2008.

CLUFF, K. et al. Optical scattering with hyperspectral imaging to classify longissimus dorsi muscle based on beef tenderness using multivariate modeling. **Meat Science**, Barking, v. 95, n. 1, p. 42-50, Sept. 2013.

CROSS, H. R.; WEST, R. L.; DUTSON, T. R. Comparison of methods for measuring sarcomere length in beef semitendinosus muscle. **Meat Science**, Barking, v. 5, n. 4, p. 261-266, July 1981.

CROUSE, J. D. et al. Comparisons of *Bos Indicus* and *Bos Taurus* inheritance for carcass beef characteristics and meat palatability. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 67, n. 10, p. 2661-2668, 1989.

CRUZEN, S. M. et al. Postmortem proteolysis in three muscles from growing and mature beef cattle. **Meat Science**, Barking, v. 96, n. 2, p. 854-861, Feb. 2014.

DAVEY, C. L.; GILBERT, K. V. Changes in the fine structure of meat during aging. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 34, p. 69-74, 1969.

DUARTE, M. S. et al. Calpastatin activity and beef tenderness of nellore and angus cattle fed two feeding strategies. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MEAT SCIENCE AND TECHNOLOGY, 59., 2013, Izmir. **Proceedings...** Izmir: Meat Science, 2013. p. 1-4.

ECHEVARNE, C.; RENERRE, M.; LABAS, R. Metmyoglobin reductase activity in bovine muscles. **Meat Science**, Barking, v. 27, n. 2, p. 161-172, 1990.

ELMASRY, G.; SUN, D.-W.; ALLEN, P. Near-infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 110, n. 1, p. 127-140, May 2012.

ELMASRY, G.; SUN, D.-W.; ALLEN, P. Non-destructive determination of water-holding capacity in fresh beef by using NIR hyperspectral imaging. **Food Research International**, Barking, v. 44, n. 9, p. 2624-2633, Nov. 2011.

FAUSTMAN, C.; CASSEN, G. R. The biochemical basis for discoloration in fresh meat: a review. **Journal of Muscle Foods**, Trumbull, v. 1, n. 3, p. 217-243, July 1990.

FELDHUSEN, F. et al. Influence of storage time on parameters of colour stability of beef. **Meat Science**, Barking, v. 40, n. 2, p. 235-243, 1995.

FELDKAMP, T. J.; SCHROEDER, T. C.; LUSK, J. L. Determining consumer valuation of differentiated beef steak quality attributes. **Journal of Muscle Foods**, Trumbull, v. 16, n. 1, p. 1-15, Jan. 2005.

FERGUSON, D. M. et al. Effect of electrical stimulation on protease activity and tenderness of *M. longissimus* from cattle with different proportions of *Bos indicus* content. **Meat Science**, Barking, v. 55, n. 3, p. 265-272, July 2000.

FUJII, H. et al. Blood flow observed by time-varying laser speckle. **Optics Letters**, New York, v. 10, n. 3, p. 104-106, Mar. 1985.

GEESINK, G. H. et al. Micro-calpain is essential for postmortem proteolysis of muscle proteins. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 84, n. 10, p. 2834-2840, Oct. 2006.

GIRARD, I. et al. Contribution of myofibrillar and connective tissue components to the Warner-Bratzler shear force of cooked beef. **Meat Science**, Barking, v. 92, n. 4, p. 775-782, Dec. 2012.

GOLL, D. E. et al. The calpain system. **Physiological Reviews**, Baltimore, v. 83, n. 3, p. 731-801, July 2003.

GRANGER, C. et al. Influence of formulation on the structural networks in ice cream. **International Dairy Journal**, Barking, v. 15, n. 3, p. 255-262, Mar. 2005.

GRUNERT, K. G. What's in a steak? A cross-cultural study on the quality perception of beef. **Food Quality and Preference**, Barking, v. 8, n. 3, p. 157-174, May 1997.

GRUNERT, K. G.; BREDAHL, L.; BRUNSØ, K. Consumer perception of meat quality and implications for product development in the meat sector: a review. **Meat Science**, Barking, v. 66, n. 2, p. 259-272, Feb. 2004.

GURSANSKY, B. et al. Tenderness enhancement of beef from *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle following electrical stimulation. **Meat Science**, Barking, v. 86, n. 3, p. 635-641, Nov. 2010.

HONIKEL, K. O. Conversion of muscle to meat. In: JENSEN, W. K.; DEVINE, C. E.; DIKEMAN, M. (Ed.). **Encyclopedia of meat sciences**. Oxford: Elsevier Academic Press, 2004. p. 314-323.

HONIKEL, K. O. et al. Sarcomere shortening of pre rigor muscles and its influence on drip loss. **Meat Science**, Barking, v. 16, n. 4, p. 267-282, 1986.

HONIKEL, K. O.; HAMM, R. Measurement of water holding capacity and juiceness. In: PEARSON, A. M.; DUTSON, T. R. (Ed.). **Quality attributes and their measurement in meat, poultry and fish products**. New York: Blackie Academic & Professional, 1994. p. 125-161.

HOOD, D. E. Factors affecting the rate of metmyoglobin accumulation in pre-packaged beef. **Meat Science**, Barking, v. 4, n. 4, p. 247-265, Aug. 1980.

HOU, X. et al. Effect of suspension method and aging time on meat quality of Chinese fattened cattle *M. Longissimus dorsi*. **Meat Science**, Barking, v. 96, n. 1, p. 640-645, Jan. 2014.

HUFF-LONERGAN, E.; LONERGAN, S. M. Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes. **Meat Science**, Barking, v.71, n.1, p.194-204, 2005.

HUGHES, J. M. et al. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. **Meat Science**, Barking, v. 98, n. 3, p. 520-532, Nov. 2014.

HUNT, M. C. et al. AMSA Guidelines for Meat Color Evaluation. In: *of 44th ANNUAL RECIPROCAL MEAT CONFERENCE*, 44., 1991, Manhattan. **Proceedings...** Manhattan: Kansas State University, 1991. p. 3-17.

JEREMIAH, L. E.; GIBSON, L. L. The influence of packaging and storage time on the retail properties and case-life of retail-ready beef. **Food Research International**, Barking, v. 34, n. 7, p. 621-631, 2001.

JEREMIAH, L. Packaging alternatives to deliver fresh meats using short- or long-term distribution. **Food Research International**, Barking, v. 34, n. 9, p. 749-772, 2001.

JOHNSON, R. D. et al. Effects of percentage brahman and angus breeding, age-season of feeding and slaughter end point on meat palatability and muscle

characteristics. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 68, n. 7, p. 1980-1986, July 1990.

KEMP, C. M. et al. Tenderness--an enzymatic view. **Meat Science**, Barking, v. 84, n. 2, p. 248-256, Feb. 2010.

KIM, Y. H. B.; WARNER, R. D.; ROSENVOLD, K. Influence of high pre-rigor temperature and fast pH fall on muscle proteins and meat quality: a review. **Animal Production Science**, Amsterdam, v. 54, p. 375-395, 2014.

KING, D. A. et al. Contribution of genetic influences to animal-to-animal variation in myoglobin content and beef lean color stability. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 88, n. 3, p. 1160-1167, Mar. 2010.

KING, D. A. et al. Sampling and aging effects on beef longissimus color stability measurements. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 90, n. 10, p. 3596-3605, Oct. 2012.

KING, D. A.; SHACKELFORD, S. D.; WHEELER, T. L. Relative contributions of animal and muscle effects to variation in beef lean color stability. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 89, n. 5, p. 1434-1451, May 2011.

KONDJOYAN, A. et al. Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat. **Meat Science**, Barking, v. 95, n. 2, p. 336-344, Oct. 2013.

KONDJOYAN, A. et al. Towards models for the prediction of beef meat quality during cooking. **Meat Science**, Barking, v. 97, n. 3, p. 323-331, July 2014.

KOOHMARAIE, M. Biochemical factors regulating the toughening and tenderization processes of meat. **Meat Science**, Barking, v. 43, p. 193-201, 1996. Suplemento.

KOOHMARAIE, M. Effect of pH, temperature and inhibitors on autolysis and catalytic activity of bovine skeletal muscle calpain. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 70, n. 10, p. 3071-3080, Oct. 1992.

KOOHMARAIE, M. et al. Meat tenderness and muscle growth: is there any relationship? **Meat Science**, Barking, v. 62, n. 3, p. 345-352, Nov. 2002.

KOOHMARAIE, M. Muscle proteinases and meat aging. **Meat Science**, Barking, v. 36, n. 1-2, p. 93-104, 1994.

KOOHMARAIE, M.; GEESINK, G. H. Contribution of postmortem muscle biochemistry to the delivery of consistent meat quality with particular focus on the calpain system. **Meat Science**, Barking, v. 74, n. 1, p. 34-43, Sept. 2006.

KOOLMEES, P. A.; KORTEKNIE, F.; SMULDERS, F. J. M. Accuracy and utility of sarcomere length assessment by laser diffraction. **Food Microstructure**, Oxford, v. 5, p. 71-76, 1986.

KRZYWICKI, K. Assessment of relative content of myoglobin, oxymyoglobin and metmyoglobin at the surface of beef. **Meat Science**, Barking, v. 3, n. 1, p. 1, 1-10, Jan. 1979.

LAGERSTEDT, A.; LUNDSTRÖM, K.; LINDAHL, G. Influence of vacuum or high-oxygen modified atmosphere packaging on quality of beef *M. longissimus dorsi* steaks after different ageing times. **Meat Science**, Barking, v. 87, n. 2, p.101-106, Feb. 2011.

LANARI, M. C.; CASSENS, R. G. Mitochondrial activity and beef muscle color stability. **Journal of Food Science**, Chicago, v.56, n. 6, p.1476-1479, Nov. 1991.

LEE, S. H.; JOO, S. T.; RYU, Y. C. Skeletal muscle fiber type and myofibrillar proteins in relation to meat quality. **Meat Science**, Barking, v. 86, n. 1, p. 166-170, Sept. 2010.

LEFAUCHEUR, L. A second look into fibre typing: relation to meat quality. **Meat Science**, Barking, v. 84, n. 2, p. 257-270, Feb. 2010.

LEROY, B. et al. Prediction of technological and organoleptic properties of beef *Longissimus thoracis* from near-infrared reflectance and transmission spectra. **Meat Science**, Barking, v. 66, n. 1, p. 45-54, Jan. 2003.

LI, P. et al. Imaging cerebral blood flow through the intact rat skull with temporal laser speckle imaging. **Optics Letters**, New York, v. 31, n. 12, p. 1824-1826, June 2006.

LIU, Y. et al. Prediction of color, texture, and sensory characteristics of beef steaks by visible and near infrared reflectance spectroscopy. A feasibility study. **Meat Science**, Barking, v. 65, n. 3, p. 1107-1115, Nov. 2003.

LONERGAN, E. H.; ZHANG, W.; LONERGAN, S. M. Biochemistry of postmortem muscle - lessons on mechanisms of meat tenderization. **Meat Science**, Barking, v. 86, n. 1, p. 184-195, Sept. 2010.

LUSK, J.; FOX, J. In-store valuation of steak tenderness. **American Journal of Agricultural Economics**, Saint Paul, v. 83, n. 3, p. 539-550, Aug. 2001.

LYFORD, C. et al. Is willingness to pay (WTP) for beef quality grades affected by consumer demographics and meat consumption preferences ? **Australasian Agribusiness Review**, Essex, v. 18, p. 1-17, Jan. 2010.

MACDOUGALL, D. B. Changes in colour of meat. **Food Chemistry**, London, v. 9, p. 75-88, 1982.

MADHAVI, D. L.; CARPENTER, C. E. Aging and processing affect color, metmyoglobin reductase and oxygen consumption of beef muscles. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 58, n. 5, p. 939-947, 1993.

MANCINI, R. A.; HUNT, M. C. Current research in meat color. **Meat Science**, Barking, v. 71, n. 1, p. 100-121, Sept. 2005.

MANCINI, R. A.; RAMANATHAN, R. Effects of postmortem storage time on color and mitochondria in beef. **Meat Science**, Barking, v. 98, n. 1, p. 65-70, Sept. 2014.

MARCHI, M. de et al. The relevance of different near infrared technologies and sample treatments for predicting meat quality traits in commercial beef cuts. **Meat Science**, Barking, v. 93, n. 2, p. 329-335, Feb. 2013.

MARCHI, M. de et al. On-line prediction of beef quality traits using near infrared spectroscopy. **Meat Science**, Barking, v. 94, n. 4, p. 455-460, Aug. 2013.

MARSHALL, D. M. Breed differences and genetic parameters for body composition traits in beef cattle. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 72, n. 2, p. 2745-2755, Oct. 1994.

MARTINS, T. S. **Fibrogênese e adipogênese intramuscular e proteólise post mortem em bovinos Nelore e Angus**. 2015. 55 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

MCKENNA, D. R. et al. Biochemical and physical factors affecting discoloration characteristics of 19 bovine muscles. **Meat Science**, Barking, v. 70, n. 4, p. 665-682, Aug. 2005.

MILLER, M. F. et al. Consumer thresholds for establishing the value of beef tenderness. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 79, n. 12, p. 3062-3068, Dec. 2001.

MOREIRA, J.; CARDOSO, R. R.; BRAGA, R. A. Quality test protocol to dynamic laser speckle analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 61, p. 8-13, Oct. 2014.

NAGANATHAN, G. K. et al. A prototype on-line AOTF hyperspectral image acquisition system for tenderness assessment of beef carcasses. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 154, p. 1-9, June 2015.

NAGANATHAN, G. K. et al. Visible/near-infrared hyperspectral imaging for beef tenderness prediction. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 64, n. 2, p. 225-233, Jan. 2008.

NOVALES, B. et al. Characterization of emulsions and suspensions by video image analysis. **Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 221, n. 1-3, p. 81-89, July 2003.

NOWAK, D. Enzymes in tenderization of meat: the system of calpains and other systems: a review. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, Olsztyn, v. 61, n. 4, p. 231-237, Dec. 2011.

O'KEEFFE, M.; HOOD, D. E. Biochemical factors influencing metmyoglobin formation on beef from muscles of differing colour stability. **Meat Science**, Barking, v. 7, n. 3, p. 209-228, Nov. 1982.

OFFER, G. et al. The structural basis of the water-holding, appearance and toughness of meat and meat products. **Food Microstructure**, Oxford, v. 8, p. 151-170, 1989.

OFFER, G. Modelling of the formation of pale, soft and exudative meat: effects of chilling regime and rate and extent of glycolysis. **Meat Science**, Barking, v. 30, n. 2, p. 157-184, 1991.

OFFER, G.; COUSINS, T. The mechanism of drip production: formation of two compartments of extracellular space in muscle post mortem. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 58, n. 1, p. 107-116, 1992.

OFFER, G.; KNIGHT, P. The structural basis of water holding in meat. In: LAWRIE, R. A. (Ed.). **Developments in meat science**: volume 4. New York: Elsevier Applied Science, 1988. p. 63-243.

OFFER, G.; TRINICK, J. On the mechanism of water holding in meat: the swelling and shrinking of myofibrils. **Meat Science**, Barking, v. 8, n. 4, p. 245-281, 1983.

OHTSU, M.; OTSUKA, Y.; TERAMACHI, Y. Precise measurements and computer simulations of mode-hopping phenomena in semiconductor lasers. **Applied Physics Letters**, New York, v. 46, n. 2, p. 108-110, Feb. 1985.

PAJUELO, M. et al. Bio-speckle assessment of bruising in fruits. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 40, n. 1-2, p. 13-24, July/Aug. 2003.

PARK, B. et al. Near-infrared reflectance analysis for predicting beef longissimus tenderness. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 76, n. 8, p. 2115-2120, Aug. 1998.

PEARCE, K. L. et al. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes--a review. **Meat Science**, Barking, v. 89, n. 2, p. 111-124, Oct. 2011.

POLKINGHORNE, R. J.; THOMPSON, J. M. Meat standards and grading: a world view. **Meat Science**, Barking, v. 86, n. 1, p. 227-235, Sept. 2010.

PRIETO, N. et al. Ability of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to estimate physical parameters of adult steers (oxen) and young cattle meat samples. **Meat Science**, Barking, v. 79, n. 4. p. 692-699, Aug. 2008.

PRIETO, N. et al. Application of near infrared reflectance spectroscopy to predict meat and meat products quality: a review. **Meat Science**, Barking, v. 83, n. 2, p. 175-186, Oct. 2009a.

PRIETO, N. et al. On-line application of visible and near infrared reflectance spectroscopy to predict chemical-physical and sensory characteristics of beef quality. **Meat Science**, Barking, v. 83, n. 1, p. 96-103, Sept. 2009b.

RABAL, H. J.; BRAGA, R. A. **Dynamic laser speckle and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2010. 282 p.

RABELO, G. F. et al. Frequency response of biospeckle laser images of bean seeds contaminated by fungi. **Biosystems Engineering**, London, v. 110, n. 3, p. 297-301, Nov. 2011.

RABELO, G. F.; BRAGA, R. A.; FABBRO, I. M. D. Laser speckle techniques in quality evaluation of orange fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 570-575, out./dez. 2005.

RAMOS, E. M.; GOMIDE, L. A. M. **Avaliação da qualidade de carnes: fundamentos e metodologia**. Viçosa: Editora da UFV, 2007. 599 p.

RANASINGHESAGARA, J. et al. Imaging optical diffuse reflectance in beef muscles for tenderness prediction. **Meat Science**, Barking, v. 84, n. 3, p. 413-421, Mar. 2010.

RENERRE, M.; THEIX, I. Factors involved in the discoloration of beef meat. **International Journal of Food Science and Technology**, Mysore, v. 25, n. 6, p. 613-630, Dec. 1990.

RESTLE, J. et al. Características de carcaça e da carne de novilhos de diferentes genótipos de Hereford x Nelore. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 28, n. 10, p. 1245-1251, out. 1999.

RHEE, M. S. et al. Variation in palatability and biochemical traits within and among eleven beef muscles. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 82, n. 2, p. 534-550, Feb. 2004.

RIBEIRO, K. M. et al. Continuous, high-resolution biospeckle imaging reveals a discrete zone of activity at the root apex that responds to contact with obstacles. **Annals of Botany**, Oxford, v. 113, n. 3, p. 555-563, Feb. 2014.

RIPOLL, G. et al. Near-infrared reflectance spectroscopy for predicting chemical, instrumental and sensory quality of beef. **Meat Science**, Barking, v. 80, n. 3, p. 697-702, Nov. 2008.

RØDBOTTEN, R.; MEVIK, B. H.; HILDRUM, K. I. Prediction and classification of tenderness in beef from non-invasive diode array detected NIR spectra. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 9, n. 3, p. 199-210, 2001.

RØDBOTTEN, R.; NILSEN, B. N.; HILDRUM, K. I. Prediction of beef quality attributes from early post mortem near infrared reflectance spectra. **Food Chemistry**, London, v. 69, n. 4, p. 427-436, June 2000.

ROMERO, G. G. et al. Bio-speckle activity applied to the assessment of tomato fruit ripening. **Biosystems Engineering**, London, v. 103, n. 1, p. 116-119, May 2009.

SENDRA, I. L. et al. Decomposition of biospeckle images in temporary spectral bands. **Optics Letters**, New York, v. 30, n. 13, p. 1641-1643, July 2005.

SEYFERT, M. et al. Color stability, reducing activity, and cytochrome c oxidase activity of five bovine muscles. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 54, n. 23, p. 8919-8925, Nov. 2006.

SHACKELFORD, S. D. et al. An evaluation of tenderness of the longissimus muscle of Angus by Hereford versus Brahman crossbred heifers. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 69, n. 1, p. 171-177, Jan. 1991.

SHACKELFORD, S. D. et al. Consumer impressions of tender select beef. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 79, n. 10, p. 2605-2614, Oct. 2001.

SHACKELFORD, S. D. et al. Heritabilities and phenotypic and genetic correlations for bovine postrigor calpastatin activity, intramuscular fat content, Warner-Bratzler shear force, retail product yield, and growth rate. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 72, n. 4, p. 857-863, Apr. 1994.

SHACKELFORD, S. D.; WHEELER, T. L.; KOOHMARAIE, M. On-line classification of US Select beef carcasses for longissimus tenderness using visible and near-infrared reflectance spectroscopy. **Meat Science**, Barking, v. 69, n. 3, p. 409-415, Mar. 2005.

SHANKS, B. C.; WULF, D. M.; MADDOCK, R. J. Technical note: the effect of freezing on Warner-Bratzler shear force values of beef longissimus steaks across several postmortem aging periods. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 80, n. 8, p. 2122-2125, Aug. 2002.

SILVA, D. R. G. et al. Comparison of Warner-Bratzler shear force values between round and square cross-section cores from cooked beef and pork Longissimus muscle. **Meat Science**, Barking, v. 103, p. 1-6, May 2015.

SILVEIRA, I. D. B.; FISCHER, V.; SOARES, G. J. D. Relação entre o genótipo e o temperamento de novilhos em pastejo e seu efeito na qualidade da carne. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 519-526, mar./abr. 2006.

SMULDERS, F. J. M. et al. Beef tenderness and sarcomere length. **Meat Science**, Barking, v. 28, n. 4, p. 349-363, 1990.

STRAADT, I. K. et al. Aging-induced changes in microstructure and water distribution in fresh and cooked pork in relation to water-holding capacity and cooking loss: a combined confocal laser scanning microscopy (CLSM) and low-field nuclear magnetic resonance relaxation study. **Meat Science**, Barking, v. 75, n. 4, p. 687-695, Apr. 2007.

SZYMANSKA-CHARGOT, M.; ADAMIAK, A.; ZDUNEK, A. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 145, p. 23-28, Sept. 2012.

TORNBERG, E. Effects of heat on meat proteins: implications on structure and quality of meat products. **Meat Science**, Barking, v. 70, n. 3, p. 493-508, July 2005.

TROY, D. J.; KERRY, J. P. Consumer perception and the role of science in the meat industry. **Meat Science**, Barking, v. 86, n. 1, p. 214-226, Sept. 2010.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. **Livestock and poultry: world markets and trade**. Estados Unidos: USDA, 2014. 22 p. Disponível em: <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.

VENEL, C. et al. Prediction of tenderness and other quality attributes of beef by near infrared reflectance spectroscopy between 750 and 1100 nm; further studies. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 9, p. 185-198, 2001.

VITALE, M. et al. Effect of aging time in vacuum on tenderness, and color and lipid stability of beef from mature cows during display in high oxygen atmosphere package. **Meat Science**, Barking, v. 96, n. 1, p. 270-277, Jan. 2014.

WARNER, R. D. et al. A consumer sensory study of the influence of rigor temperature on eating quality and ageing potential of beef striploin and rump. **Animal Production Science**, Amsterdam, v. 54, n. 4, p. 396-406, Feb. 2014a.

WARNER, R. D. et al. Genetic and environmental effects on meat quality. **Meat Science**, Barking, v. 86, n. 1, p. 171-183, Sept. 2010.

WARNER, R. D. et al. Pre-rigor carcass stretching counteracts the negative effects of high rigor temperature on tenderness and water-holding capacity – using lamb muscles as a model. **Animal Production Science**, Amsterdam, v. 54, n. 4, p. 494-503, Feb. 2014b.

WHEELER, T. L. et al. Mechanisms associated with the variation in tenderness of meat from Brahman and Hereford cattle. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 68, n. 12, p. 4206-4220, Dec. 1990.

WHEELER, T. L.; KOOHMARAIE, M. The extent of proteolysis is independent of sarcomere length in lamb longissimus and psoas major. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 77, n. 9, p. 2444-2451, Sept. 1999.

WHEELER, T. L.; SHACKELFORD, S. D.; KOOHMARAIE, M. Variation in proteolysis, sarcomere length, collagen content, and tenderness among major pork muscles. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 78, n. 4, p. 958-965, Apr. 2000.

WHIPPLE, G. et al. Evaluation of attributes that affect longissimus muscle tenderness in *Bos taurus* and *Bos indicus* cattle. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 68, n. 9, p. 2716-2728, Sept. 1990.

WU, J. et al. Prediction of beef quality attributes using VIS/NIR hyperspectral scattering imaging technique. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 109, n. 2, p. 267-273, Mar. 2012.

WU, J. et al. Study of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing beef quality characteristics. **Spectroscopy and Spectral Analysis**, Beijing, v. 30, n. 7, p. 1815-1819, July 2010.

WU, Z. et al. Influence of aging and salting on protein secondary structures and water distribution in uncooked and cooked pork. A combined FT-IR microspectroscopy and ¹H NMR relaxometry study. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 54, n. 22, p. 8589-8597, Nov. 2006.

XIA, J. J. et al. Characterizing beef muscles with optical scattering and absorption coefficients in VIS-NIR region. **Meat Science**, Barking, v. 75, n. 1, p. 78-83, Jan. 2007.

XIONG, Z. et al. Recent developments of hyperspectral imaging systems and their applications in detecting quality attributes of red meats: a review. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 132, p. 1-13, July 2014.

ZDUNEK, A.; CYBULSKA, J. Relation of biospeckle activity with quality attributes of apples. **Sensors**, New York, v. 11, n. 6, p. 6317-6327, June 2011.

ZDUNEK, A.; HERPPICH, W. B. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v. 64, n. 4, p. 58-63, Feb. 2012.