UFRRJ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

DISSERTAÇÃO

Efeito do açúcar na extrusão termoplástica de diferentes genótipos de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]

Nathália Ferreira Collantes

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

EFEITO DO AÇÚCAR NA EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA DE DIFERENTES GENÓTIPOS DE SORGO [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]

NATHÁLIA FERREIRA COLLANTES

Sob a Orientação do Professor Doutor
Carlos Wanderlei Piler de Carvalho

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências** no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Área de Concentração em Tecnologia de Alimentos.

Seropédica, RJ
Agosto de 2017

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C697e

Collantes, Nathália Ferreira , 1990-
Efeito do açúcar na extrusão termoplástica de diferentes genótipos de sorgo [Sorghum bicolor (L.) Moench] / Nathália Ferreira Collantes. - 2017.
80 f.: il.

Orientador: Carlos Wanderlei Piler de Carvalho.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2017.

1. Tecnologia de Alimentos - Teses. 2. Extrusão - Processamento - Teses. 3. Sorgo - Teses. I. de Carvalho, Carlos Wanderlei Piler , 1967-, orient. II Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Pós graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

NATHÁLIA FERREIRA COLLANTES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, área de Concentração em Tecnologia de Alimentos.
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21/08/2017.

Carlos Wanderlei Piler de Carvalho (Ph.D.) Embrapa Agroindústria de Alimentos
(Orientador)

José Luis Ramírez Ascheri (D.Sc) Embrapa Agroindústria de Alimentos
(Membro)

Rogério Germani (Ph.D.) Embrapa Agroindústria de Alimentos
(Membro)

DEDICATÓRIA

Dedico à minha família pelo amor, força e ajuda nesses últimos anos. Obrigada, por apoiar minhas decisões e acreditar em mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e pela sua infinita grandeza, que nos mantém firmes para vencer todas as dificuldades.
À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e ao programa de pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela oportunidade de estudar e me desenvolver mais profissionalmente.
À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.
À Embrapa Agroindústria de Alimentos (CTAA) e Embrapa Milho e Sorgo (CNPMS), pela possibilidade de realização da pesquisa.
Ao meu orientador, Ph.D. Carlos Wanderlei Piler de Carvalho, pela atenção e orientação.
Aos colegas Davy Hidalgo Chávez, Cristiany Oliveira Bernardo e Jhonny Vargas pela ajuda na rotina dos laboratórios e contribuição na realização das análises estatísticas.
A todos os funcionários da Embrapa, em especial: Mariana da C. Mattos, Adriana P. da S. Minguita, Francisco Carlos de Oliveira, Melicia C. Galdeano, Cristina Y. Takeiti, Érika Fraga de Souza, Henriqueta Talita Guimarães Barboza e Neuri dos S. Menezes.
Aos companheiros de classe do mestrado e aos professores do programa, pelo apoio e conhecimento compartilhado.

RESUMO

COLLANTES, Nathália Ferreira. **Efeito do açúcar na extrusão termoplástica de diferentes genótipos de sorgo [Sorghum bicolor (L.) Moench]**. 2017. 80p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Instituto de Tecnologia, Departamento de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

A demanda por alimentos prontos para consumo (RTE – *ready-to-eat*) tem aumentado devido à comodidade que os mesmos trazem ao consumidor. Pesquisas evidenciam um potencial em desenvolver RTEs extrudados, a partir da substituição de farinhas refinadas de cereais por cereais integrais, melhores em digestibilidade de amido e proteína e ricos em componentes bioativos, tais como fibras dietéticas e compostos fenólicos. De forma a tornar os produtos RTE mais aceitáveis, alguns ingredientes são adicionados, como o açúcar. Os efeitos do açúcar sobre o processamento de extrusão e parâmetros de qualidade de produtos expandidos têm sido investigados extensivamente, entretanto esses efeitos podem variar de acordo com a concentração e o tipo de açúcar adicionado, o teor de umidade da farinha para extrusão e o cereal utilizado para produzir os mesmos. Nota-se que há uma necessidade de desenvolver estudos a partir de cereais isentos de glúten e ricos em compostos bioativos, bem como processos que são seguros e econômicos para o consumidor, associados ou não ao açúcar. Considerando essa necessidade, o presente trabalho propõe estudar o efeito do açúcar (sacarose) na extrusão termoplástica de diferentes genótipos de sorgo integral, a fim de obter novos produtos prontos para consumo. Farinhas integrais de seis genótipos de sorgos de cor de pericarpo variado: branco (CMSS 005 e BRS 501), vermelho (BRS 330 e BRS 373) e marrom (BR 305 e SC 319), acrescidas com 0% e 10% de açúcar, foram processadas em uma extrusora mono-rosca, a parâmetros de processamento constantes. As mudanças promovidas pelo processo de cozimento por extrusão foram avaliadas via energia mecânica específica, torque, densidade aparente, propriedades de expansão, propriedades mecânicas, propriedades de hidratação, variação da cor e propriedades de pasta, bem como os compostos fenólicos totais e taninos condensados foram quantificados. Valores EME variaram de acordo com o genótipo e não variaram, significativamente, com o teor de açúcar. Os valores do índice de expansão radial foram maiores para os tratamentos com 0% de açúcar, com exceção de BRS 501, que apresentou suas características físicas atreladas ao seu maior teor de lipídios. Os resultados de viscosidade de pasta, para os tratamentos com 0% de açúcar indicaram perda da estrutura e do arranjo dos grânulos de amido após a extrusão. Todos os extrudados apresentaram valores de propriedades mecânicas lineares, que indicam homogeneidade em expansão e na espessura dos extrudados, com exceção de T2 (BRS 501, com 0% de açúcar). Todos os extrudados apresentaram teor de compostos fenólicos em sua composição. Os genótipos BR 305 e SC 319 apresentaram teor de taninos condensados e o extrudado BRS 305 com 10% de açúcar apresentou 1,11 $mg.100g^{-1}$ de taninos condensados, indicando que a adição de açúcar pode ter evitado a degradação de parte dos taninos durante a extrusão.

Palavras-chave: Extrudados, propriedades físico-químicas, compostos fenólicos.

ABSTRACT

COLLANTES, Nathália Ferreira. **Effect of sugar on thermoplastic extrusion of different sorghum genotypes [Sorghum bicolor (L.) Moench].** 2017. 110p. Dissertation (Master in Food Science and Technology) - Institute of Technology, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

The demand for ready-to-eat (RTE) food has increased due to the convenience they bring to the consumer. Researches evidences a potential in developing extruded RTEs by replacing refined cereal flours with whole grains, better in digestibility of starch and protein and rich in bioactive components, such as dietary fibers and phenolic compounds. In order to make RTEs products more acceptable, some ingredients are added, such as sugar. The effects of sugar on the extrusion process and quality parameters of expanded products have been investigated extensively, however these effects may vary according to the concentration and type of sugar added, the moisture content of the flour for extrusion and the cereal used to produce the same. There is a need to develop studies from gluten-free cereals and rich in bioactive compounds, as well as processes that are safe and economical for the consumer, associated or not with the sugar. Therefore, the present work proposes to study the effect of sugar (sucrose) on the thermoplastic extrusion of different genotypes of whole sorghum, in order to obtain new products ready for consumption. Whole grains of six sorghum genotypes with the color of the pericarp varied: white (CMSS 005 and BRS 501), red (BRS 330 and BRS 373) and brown (BR 305 and SC 319), added with 0% and 10% sugar were processed in a single-screw extruder at constant processing parameters. The changes promoted by the extrusion cooking process were evaluated by specific mechanical energy (SME), torque, apparent density, expansion properties, mechanical properties, hydration properties, color variation and paste properties, as well as total phenolic compounds and condensed tannins were quantified. SME values varied according to the genotype and did not vary significantly with the sugar content. The values of the radial expansion index were higher for the 0% sugar treatments, except for BRS 501, which presented its physical characteristics linked to the its higher lipid content. The paste viscosity results for treatments with 0% sugar indicated leakage of structure and arrangement of their starch granules after extrusion. All the extruded presented values of linear mechanical properties, which indicate expansion homogeneity and thickness of the extruded, except for T2 (BRS 501, with 0% sugar). All the extruded presented phenolic compounds content in their composition. The genotypes BR 305 and SC 319 presented condensed tannin content in their composition and the BRS 305 extrudate with 10% sugar had 1.11 $mg.100g^{-1}$ of condensed tannins, indicating that the plasticizing effect of the sugar may have prevented tannin degradation during the extrusion.

Keywords: Extruded, physico-chemical properties, phenolic compounds.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Objetivo geral 1
1.2 Objetivos específicos 2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1. Sorgo 3
2.1.1. Estrutura do grão de sorgo 4
2.1.2. Composição química do sorgo 5
2.1.2.1 Amido 5
2.1.2.2 Proteínas 5
2.1.2.3 Lipídios 6
2.1.2.3 Compostos fenólicos 6
2.1.2.4 Taninos 7
2.2 Extrusão termoplástica 8
2.3 Efeitos do açúcar na extrusão 12
3 MATERIAL E MÉTODOS 15
3.1. Local de execução 15
3.2 Matéria-prima 15
3.2.1 Sorgo 15
3.2.2 Insumos 15
3.3 Métodos 15
3.3.1 Caracterização química da matéria-prima 15
3.3.1.1 Umidade 15
3.3.1.2 Proteínas 15
3.3.1.3 Lipídios 15
3.3.1.4 Cinzas 15
3.3.1.5 Carboidratos totais 16
3.3.1.6 Fibra alimentar 16
3.3.1.7 Composição em minerais 16
3.3.2 Preparo e acondicionamento das farinhas cruas 16
3.3.3 Distribuição granulométrica das farinhas integrais de sorgo 17
3.3.4 Condições de processamento de extrusão 17

3.3.5 Variáveis do processo de extrusão 18
3.3.5.1 Vazão ou fluxo mássico de extrusão 18
3.3.5.2 Energia mecânica específica (EME) 18
3.3.6 Propriedades físicas dos extrudados 18
3.3.6.1 Índice de expansão e densidade aparente 18
3.3.6.2 Índice de solubilidade em água (ISA) e índice de absorção de água (IAA) 19
3.3.6.3 Determinação da viscosidade de pasta 19
3.3.6.4 Determinação de cor 20
3.3.7 Propriedades mecânicas dos extrudados 21
3.3.8. Quantificação de compostos fenólicos totais (CFT) 22
3.3.8.1 Extração de compostos fenólicos totais 22
3.3.8.2 Quantificação de compostos fenólicos totais 22
3.3.9 Taninos condensados 22
3.4 Delineamento experimental 23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 24
4.1 Caracterização da matéria prima 24
4.1.1 Composição centesimal 24
4.1.2 Composição em minerais 27
4.2 Distribuição granulométrica das farinhas de sorgo 29
4.3 Variáveis do processo de extrusão 31
4.3.1 Torque e energia mecânica específica (EME) 31
4.4 Propriedades físicas dos extrudados 34
4.4.1 Índice de expansão radial (IER) e densidade aparente 34
4.4.2 Índice de solubilidade em água (ISA) e índice de absorção em água (IAA) 39
4.4.3 Cor 40
4.4.4 Viscosidade de pasta 43
4.5 Propriedades mecânicas dos extrudados 48
4.6 Análises Químicas 50
4.6.1 Compostos fenólicos totais 50
4.6.2 Taninos condensados 51
5 CONCLUSÕES 52
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 53
APÊNDICES 59

1 INTRODUÇÃO

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é o quinto cereal mais produzido no mundo e faz parte da alimentação básica em países da África e Ásia. Ele é uma boa fonte de energia, por conter em média 70% de amido, possui baixa exigência tecnológica para seu cultivo e adapta-se a regiões de clima seco que sofrem oscilações extremas de temperatura. Apesar de o sorgo ser um importante cereal e assemelhar-se à composição química do milho, ele não é, normalmente, utilizado na alimentação humana ocidental por apresentar considerável dificuldade de remoção das fibras e apresentar, em alguns cultivares, taninos que podem desenvolver um sabor adstringente ao alimento e diminuir a digestibilidade de suas proteínas. No entanto, recentemente, o sorgo tem sido considerado como alternativa alimentar nos países mais desenvolvidos, por ser um cereal livre de glúten e por possuir altos teores de compostos fenólicos, bem como a presença de taninos, resultando em alta capacidade antioxidante, proporcionando efeitos benéficos para a saúde do homem.

A tecnologia de extrusão é um processo térmico de cozimento que favorece o aumento de produtividade e oferece uma gama de produtos finais. É um processo contínuo que envolve forças de cisalhamento, alta pressão e alta temperatura por curto tempo, capaz de misturar ingredientes diversos e transformá-los em novas estruturas alimentares, como *snacks* e alimentos prontos para consumos com uma variedade de texturas, *flavor* e formas atraentes ao consumidor. A extrusão, ainda, não foi completamente compreendida no que diz respeito às variáveis de processamento, às interações dos ingredientes e ao efeito da modificação do material nas propriedades de textura dos produtos finais.

A demanda por alimentos prontos para consumo (RTE – *ready-to-eat*) tem aumentado pela comodidade que os mesmos trazem ao consumidor. No Brasil, esses produtos são tipicamente produzidos a partir do milho, arroz e trigo, essencialmente cereais refinados. Entretanto, muitos dos produtos existentes possuem altos teores de açúcar e sal, mas baixo valor nutricional em termos de vitaminas, minerais, aminoácidos e fibras alimentares. Contudo, pesquisas evidenciam um potencial em desenvolver RTEs extrudados melhores em digestibilidade de amido e proteína e ricos em componentes bioativos, tais como fibras dietéticas e compostos fenólicos, a partir da substituição de farinhas refinadas de cereais por cereais integrais.

De forma a tornar os produtos RTEs mais aceitáveis, alguns ingredientes são adicionados, como o açúcar. Os efeitos do açúcar sobre o processamento de extrusão e parâmetros de qualidade de produtos expandidos têm sido investigados extensivamente, porém, esses efeitos podem variar de acordo com a concentração e o tipo de açúcar adicionado, o teor de umidade da farinha para extrusão e o cereal utilizado para produzir os mesmos. Embora existam estudos realizados para abordar algumas destas questões tecnológicas e nutricionais, ainda há uma necessidade de desenvolver estudos a partir de cereais isentos de glúten e ricos em compostos bioativos, bem como processos que são seguros e econômicos para o consumidor, associados ou não ao açúcar.

Considerando a necessidade de desenvolver novos produtos isentos de glúten a base de cereais integrais de maior valor nutricional, o presente trabalho propõe estudar o efeito do açúcar (sacarose) na extrusão termoplástica de diferentes genótipos de sorgo integral, a fim de obter novos produtos prontos para consumo.

1.1 Objetivo geral

Estudar o efeito do açúcar (sacarose) na extrusão termoplástica de seis diferentes genótipos de sorgo.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar as composições centesimais e minerais dos genótipos de sorgos;
- Produzir extrudados expandidos a partir da farinha integral dos genótipos de sorgo com e sem sacarose, em condições operacionais constantes;
- Avaliar o efeito dos genótipos e do açúcar sobre as variáveis dependentes de extrusão e propriedades físico-químicas (energia mecânica específica, torque, expansão, densidade aparente, textura instrumental, propriedades de pasta e cor);
- Determinar o teor de compostos fenólicos dos extrudados de sorgo;
- Determinar o teor de taninos condensados dos genótipos de sorgo e de seus extrudados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sorgo

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] pertence à família Poaceae, é originário da África e faz parte da alimentação humana em países da Ásia, África e outras regiões semiáridas do mundo (ALTHWAB et al. 2015; CARDOSO et al. 2015; WU et al. 2017). O sorgo é classificado em quatro tipos: o granífero, o forrageiro para silagem, o forrageiro para agropecuária e o vassoura. O tipo granífero (híbridos e variedades) apresenta plantas de porte baixo com densa panícula de grãos, adaptadas à colheita mecânica (BORGES, 2013). Ele é o quinto cereal mais importante no mundo, após o arroz, trigo, milho e a cevada (ALTHWAB et al. 2015; WU et al. 2017). Segundo a FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (2017), em 2014 a produção mundial de sorgo foi de 68,9 milhões de toneladas e os principais produtores de sorgo foram os Estados Unidos, seguido por Nigéria e México. No entanto, a produção nos Estados Unidos se concentra em abastecer a alimentação animal, a produção de etanol e a exportação deste grão (ALTHWAB et al. 2015).

Em 2014, o Brasil produziu 2,27 milhões de toneladas de sorgo (FAOSTAT, 2017) e a produção em grãos no país tem dois destinos primários: consumo interno no estabelecimento rural, sendo direcionado à alimentação animal e a oferta do produto no mercado consumidor sendo direcionado para fabricação de ração e industrialização (EMBRAPA, 2008). O plantio na entre safra (safrinha) da soja e do milho já proporcionou expansão da produção agrícola de sorgo, principalmente em São Paulo, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Região do Triângulo Mineiro, e tem gerado receita extra aos agricultores, porém seu potencial produtivo não é totalmente explorado, pois ainda é cultivado em condições marginais às do milho (BORGES, 2013).

O consumo mundial de grão de sorgo é um resultado de sua capacidade de crescer em regiões áridas e de se adaptar a regiões que sofrem severas flutuações de temperatura e que são desfavoráveis à produtividade de outras forragens ou grãos, como o milho (TAYLOR, SCHOBER & BEAN, 2006; EMBRAPA, 2008; ALTHWAB et al. 2015; QUEIROZ et al. 2012). Sua versatilidade se estende desde o uso de seus grãos como alimento humano e animal, como matéria-prima para produção de álcool anidro, bebidas alcoólicas, colas e tintas, extração de açúcar de seus colmos, até as inúmeras aplicações de sua forragem na nutrição de ruminantes (EMBRAPA, 2008).

O consumo de sorgo como fonte de alimento humano tem sido lento, porém crescente em culturas ocidentais, pela demanda por alimentos e bebidas isentas de glúten, substituindo o trigo, centeio ou a cevada na alimentação (TAYLOR, SCHOBER & BEAN, 2006; ALTHWAB et al. 2015), pela demanda por ingestão de cereais integrais ricos em fibras alimentares e fitoquímicos com um grande potencial funcional (AWIKA & ROONEY, 2004; ZHU, 2014; TAYLOR, SCHOBER & BEAN, 2006; ANUNCIAÇÃO et al. 2017; WU et al. 2017). Segundo Awika & Rooney (2004) e Queiroz et al. (2012), o sorgo apresenta-se como uma alternativa ao consumo de cereais convencionais em função da elevada concentração de compostos fenólicos, tais como ácidos fenólicos, antocianinas e taninos, além do alto conteúdo de fibra alimentar. Além disso, o sorgo apresenta baixa digestibilidade de proteína e de amido, que pode ser um grande aliado no tratamento da obesidade.

O consumo de sorgo proporciona proteção contra doenças que se tornam cada vez mais comuns em sociedades ocidentais e em países em desenvolvimento, como inflamações, câncer, diabetes tipo 2, hipercolesterolemia, oxidação celular e intolerância ao glúten (AWIKA & ROONEY, 2004; ANUNCIAÇÃO et al. 2017).

2.1.1. Estrutura do grão de sorgo

O grão de sorgo possui basicamente três estruturas anatômicas distintas chamadas de: pericarpo (revestimento exterior), endosperma (tecido de armazenamento) e gérmen (embrião). Algumas variedades possuem uma quarta estrutura denominada testa, localizada entre o pericarpo e o endosperma (Figura 1) (EARP, MCDONOUGH & ROONEY, 2004; CARDOSO et al. 2015; WU et al. 2017). A proporção e a composição química das estruturas anatômicas do sorgo dependem da variedade e das condições de crescimento. Geralmente, o pericarpo e a testa (camadas exteriores) são compostos de polissacarídeos não amiláceos e compostos fenólicos (3-desoxiancianidinas, taninos e ácidos fenólicos, entre outros), normalmente, suas concentrações e perfis estão relacionados com a cor e a espessura do pericarpo (CARDOSO et al. 2015; WU, 2017).

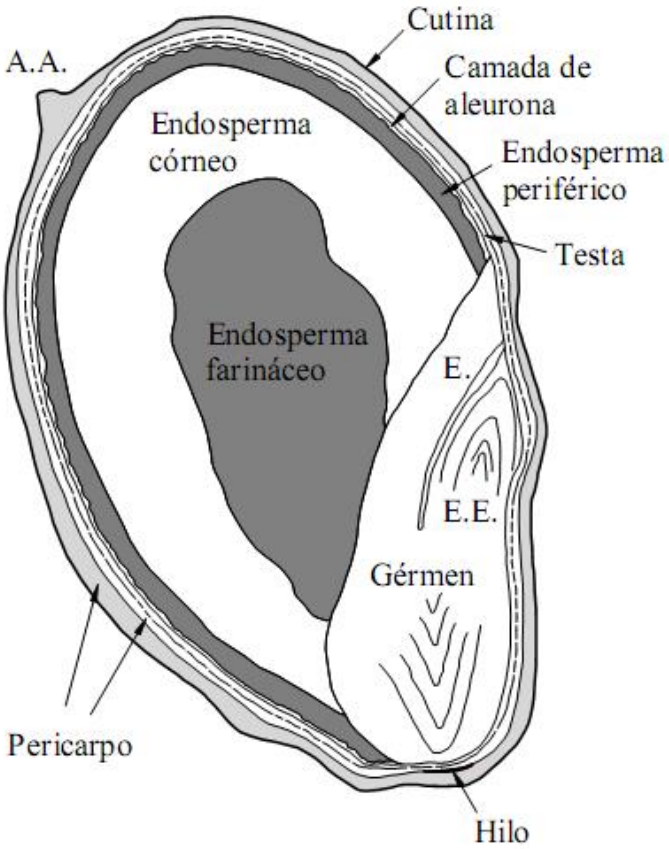


Figura 1 Esquema de um grão de sorgo. A.A.: Área apical; E.: Escutelo; E.E.: Eixo embrionário (VARGAS-SOLÓRZANO, 2013)

O endosperma periférico é rico em corpos proteicos, com poucos grânulos de amido, enquanto o endosperma córneo possui grânulos de amidos poligonais rodeados por corpos proteicos e o endosperma farináceo constitui de amidos angulares rodeados de uma fina camada de corpos proteicos (MOHARRAM & YOUSSEF, 1995; VÁRGAS-SOLÓRZANO, 2013).

O gérmen do sorgo é aderido ao grão, e não se separa facilmente durante o processo de moagem. É composto pelo eixo embrionário, o qual possui a nova planta, e o escutelo, cujas

células são responsáveis por armazenar nutrientes (MOHARRAM & YOUSSEF, 1995). O gérmen é composto por lipídios, vitaminas solúveis em gordura, vitaminas do complexo B e minerais (CARDOSO et al., 2015).

Em estudo de Moraes et al. (2015), comparou-se a composição química do farelo de sorgo (camadas mais externas do grão), grão de sorgo descorticado e grão de sorgo integral. O farelo apresentou os maiores teores de proteínas, lipídios, cinzas, fibras alimentares totais e insolúveis. Os níveis de carboidratos disponíveis diferiram entre as amostras e o sorgo descorticado apresentou o nível mais alto. Os compostos fenólicos, as antocianinas totais, os flavonoides totais, os taninos condensados e os flavonoides específicos foram encontrados em maiores quantidades no farelo de sorgo.

2.1.2. Composição química do sorgo

O grão de sorgo pode ser constituído de pericarpo branco, amarelo, vermelho, marrom ou preto. Independentemente das variações de cor, os seus principais componentes são: amido, proteína, lipídios, fibras e minerais (BORGES, 2013; ALTHWAB et al. 2015; CARDOSO et al. 2015).

Além dos componentes principais, o sorgo contém diversos fitoquímicos (incluindo compostos fenólicos, esteróis vegetais e policosanois) que são metabólitos secundários ou componentes celulares de plantas. Os fenóis ajudam na defesa natural das plantas contra pragas e doenças, enquanto os esteróis vegetais e policosanois são componentes de cera e óleos vegetais (AWIKA & ROONEY, 2004).

As variações genotípicas, as condições ambientais de cultivo e a aplicação de diferentes métodos analíticos geram valores distintos sobre a composição química do grão de sorgo (BORGES, 2013; ZHU, 2014).

2.1.2.1 Amido

O amido é o principal polissacarídeo presente no sorgo. Seu teor e a sua composição são influenciados pelas características genéticas e condições de crescimento do grão (QUEIROZ et al. 2012). Em algumas variedades, o amido varia de 32,1 a 72,5 g / 100 g e é composto por amilopectina (81,0 a 96,5%) e amilose (3,5 a 19,0%) (BOUDRIES et al. 2009). A proporção de amilose e amilopectina afeta as propriedades reológicas (gelatinização e retrogradação) e a digestibilidade do amido de sorgo (UDACHAN SAHU & HEND, 2012; CARDOSO et al. 2015). Segundo Taylor, Schober & Bean (2006), foram relatados intervalos de temperatura de gelatinização de sorgo de 67 a 73 °C para sorgos cultivados na África e 71 a 81 ºC para sorgos cultivados na Índia, sendo a temperatura de gelatinização do amido influenciada por muitos fatores, principalmente pelo comprimento de cadeias na molécula de amilopectina, que aumenta a temperatura de gelatinização.

O sorgo possui a menor digestibilidade de amido entre os cereais, e pode ser atribuída a limitações físicas relacionadas à ligação cruzada de proteínas ou à ligação de taninos ao amido ou à ligação de taninos a enzimas que hidrolisam o amido (TAYLOR & NAUSHAD EMMAMBUX, 2010; MKANDAWIRE et al. 2015; MORAES et al. 2015).

2.1.2.2 Proteínas

O grão de sorgo possui um teor proteico médio de 11%, e as proteínas de sorgo podem ser classificadas em prolaminas e não prolaminas (ALTHWAB et al. 2015). As principais prolaminas são as kafirinas ou proteínas de armazenamento. Elas contêm altos níveis de prolina e glutamina, e representam 77% a 82% da proteína no endosperma, enquanto as proteínas não prolaminas (albuminas, globulinas e glutelinas) representam cerca de 20% das proteínas. As kafirinas são classificadas como α, β, γ ou δ com base no peso molecular e na solubilidade, e são resistentes à digestão, pois são ligadas a componentes não proteicos

(como, polifenois, fitatos, lipídios, amido e componentes da parede celular) e a outras proteínas. O endosperma de sorgo contém de 66% a 84% de α-kafirina, 8% a 13% de β-kafirina e 9% a 21% de γ-kafirina, e δ-kafirina encontram-se em baixos níveis, e essas concentrações variam se o endosperma é farináceo ou vítreo (ALTHWAB et al. 2015; VARGAS-SOLÓRZANO, 2013).

As kafirinas formam corpos proteicos fortemente ligados em matriz proteica da rede de glutelinas e entrelaçados com grânulos de amido (DE MESA-STONESTREET, ALAVI & BEAN, 2010). As β e γ-kafirinas estão localizadas na região dos corpos proteicos periféricos, enquanto as α e δ-kafirinas são encapsuladas na região interna e esta conformação determina a digestibilidade das proteínas do sorgo (CARDOSO et al. 2015). A digestibilidade das proteínas do sorgo varia amplamente entre os genótipos e é, provavelmente, uma função de muitos fatores, como a estrutura física e a composição química do grão, a estrutura do corpo proteico, a reticulação de proteínas e o conteúdo (MKANDAWIRE et al. 2015).

Ao contrário das principais prolaminas do trigo (gliadina), do centeio (secalina) e da cevada (hordeína), as prolaminas do sorgo (kafirinas) não desencadeiam uma resposta alérgica ou uma reação autoimune em humanos. Assim, o sorgo é um cereal seguro para consumo por pessoas com doença celíaca (DE MESA-STONESTREET, ALAVI e BEAN, 2010; CARDOSO et al. 2015).

2.1.2.3 Lipídios

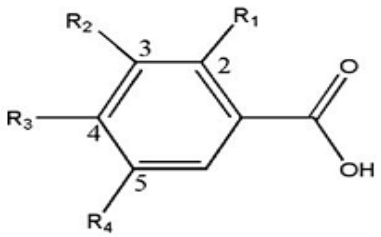
O sorgo possui conteúdo lipídico reduzido (1,24 a 3,07 g / 100 g), que é composto principalmente por ácidos graxos insaturados (CARDOSO et al. 2015). Os lipídios no sorgo estão distribuídos dentro do grão em diferentes proporções. O gérmen contém os maiores índices (~76%), seguido do endosperma (~13%) e do pericarpo (~11%). Os lipídios que recobrem a superfície do grão têm um perfil de composição único, compostos de cera e óleo numa base 2:1 ou 3:1, que contém hidrocarbonetos, ésteres de esterilo, ésteres de cera, aldeídos, álcoois, triacilglicerois, diacilglicerois, monoacilgliceróis. A fração de cera é composta de 44-55% de aldeídos e 37-44% de policosanóis, seguido por 4-8% de ácidos graxos, 0,5-0,1% de hidrocarbonetos, 1,4% de ésteres de cera e 0,3-0,4% de triacilglicerois (ALTHWAB et al. 2015). Para a fração de óleo, os triacilglicerois (~90%) são o grupo lipídico mais abundante, sendo os ácidos linoleico, oleico e palmítico os ácidos graxos mais predominantes (ALTHWAB et al. 2015; CARDOSO et al. 2015).

2.1.2.3 Compostos fenólicos

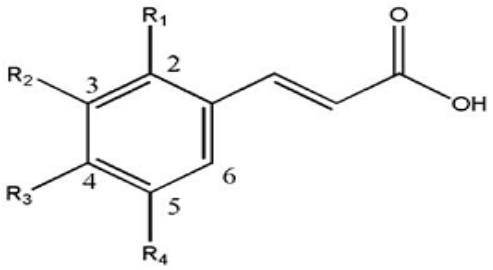
Os fitoquímicos tem a capacidade de sequestrar radicais livres presentes no organismo do ser humano e, devido sua atividade antioxidante, promover benefícios para a saúde (AWIKA & ROONEY, 2004; WU et al. 2017). O sorgo varia amplamente em composição e conteúdo de compostos fenólicos, e, tanto a genética quanto os fatores ambientais, afetam o tipo e o nível de fenóis nos grãos, sendo os genótipos que possuem testa pigmentada os de maior conteúdo fenólico (AWIKA & ROONEY, 2004; DYKES et al. 2005; ALTHWAB et al. 2015; CARDOSO et al. 2015; WU et al. 2017).

Os compostos fenólicos possuem um anel de benzeno com um ou mais grupos hidroxil em sua conformação química (WU et al. 2017). No sorgo, eles se dividem em duas categorias principais: ácidos fenólicos e flavonoides. Os ácidos fenólicos são derivados de ácido benzoico ou cinâmico (Figura 2), enquanto os flavonoides incluem taninos condensados e antocianinas como os constituintes mais importantes no sorgo (AWIKA & ROONEY, 2004; QUEIROZ et al. 2012; ALTHWAB et al. 2015). O ácido fenólico hidrobenzoico é derivado do ácido benzoico, que inclui o ácido gálico, p-hidroxibenzoico, vanílico, siríngico e o ácido protocatequínico, entre outros. O ácido hidroxicinâmico, derivado do ácido cinâmico, inclui o

ácido cumárico, cafeico, felúrico e sinápico (AWIKA & ROONEY, 2004; QUEIROZ et al. 2012).



Ácido benzóico



Ácido cinâmico

Figura 2 Estrutura química dos ácidos benzóico e cinâmico (R1=R2=R3=R4= H) (AWIKA & ROONEY, 2004)

Geralmente, os níveis de ácidos fenólicos presentes no sorgo são compatíveis com os níveis presentes em outros cereais. Dentre os flavonoides, a antocianina comumente encontrada em cultivares de sorgo é denominada de 3-deoxiantocianina, compreendendo as luteolinidinas e apigeninidinas. O sorgo é a única fonte de 3-deoxiantocianina, que está presente em grandes quantidades em alguns cultivares. Essa antocianina apresenta-se distinta das demais devido à inexistência de uma molécula de oxigênio na posição C-3, que atribui maior estabilidade molecular quando comparada a outras antocianinas encontradas nas frutas e hortaliças (QUEIROZ et al. 2012).

Semelhante a outros cereais, a maioria dos fenóis no sorgo está localizado no farelo (camadas mais externas do grão), mas diferem no fato de que o sorgo contém níveis mais altos do que a maioria dos cereais e até mesmo algumas frutas e vegetais, dependendo da variedade (AWIKA & ROONEY, 2004; ALTHWAB et al. 2015; MORAES et al. 2015; WU et al. 2017).

2.1.2.4 Taninos

Uma proporção significativa de variedades de sorgo contém taninos, que se localizam nas camadas de testa pigmentada do grão. Os taninos conferem propriedades de proteção ao grão de sorgo, principalmente contra insetos, aves e danos causados pelo meio ambiente (TAYLOR, SHOBER & BEAN, 2006; CARDOSO et al. 2015). Os taninos em sorgo têm os níveis mais altos de antioxidantes do que qualquer cereal analisado (DLAMINI, TAYLOR & ROONEY, 2007) e variam quanto ao tipo, conteúdo e distribuição dos oligómeros e polímeros individuais (CARDOSO et al. 2015).

Os taninos são compostos solúveis em água e derivados, tanto de flavonoides quanto de ácidos fenólicos, classificados como taninos condensados ou hidrolisáveis. Os taninos hidrolisáveis consistem em uma molécula de glicose ligada a moléculas de ácido gálico ou ácido elágico, sendo o mais comum o ácido tânico, que consiste de uma molécula de glicose esterificada por cinco unidades de ácido gálico (VÁRGAS-SOLÓRZANO, 2013; NIKMARAM et al. 2017).

O sorgo possui maior do conteúdo de taninos condensados (proantocianidinas) (Figura 3) do que taninos hidrolisáveis, e são produtos polimerizados de flavan-3-ol e/ou flavan-3,4-

diois, constituídos por oligómeros ou polímeros de catequinas (principal unidade de terminação) e por epicatequina. (AWIKA & ROONEY, 2004; CARDOSO et al. 2015).

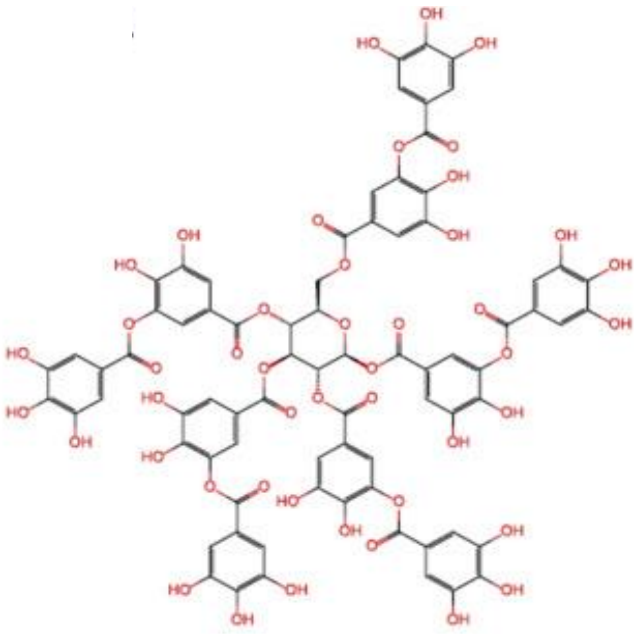


Figura 3 Estrutura química da proantocianidina, adaptado de NIKMARAM et al. (2017).

Comumente, os taninos de sorgo tem um elevado peso molecular e um grau de polimerização (DP) superior a 10 (69-81%). A redução na digestibilidade de nutrientes ocasionada pelos taninos está correlacionada, não apenas com o conteúdo de taninos no grão, mas, também, com DP, ou seja, taninos de maior peso molecular ou estruturas de taninos mais complexas (DP > 10) tendem a formarem complexos reversíveis ou irreversíveis com alguns nutrientes, principalmente às proteínas, levando à redução da biodisponibilidade de aminoácidos e proteínas (NIKMARAM et al. 2017). Mkandawire et al. (2015) encontrou baixa digestibilidade de proteína em sorgo de pericarpo vermelho, rico em taninos e digestibilidade de proteínas similar em aveia e sorgo de pericarpo branco, que não contém tanino.

A redução de taninos em processamentos térmicos ocorre pela interação de taninos com proteínas e carboidratos. Estes complexos de taninos são menos extraíveis. Os taninos de sorgo têm uma forte afinidade para proteínas ricas em prolina, como as prolaminas. (DLAMINI, TAYLOR e ROONEY, 2007).

2.2 Extrusão termoplástica

A tecnologia de extrusão termoplástica é um processo contínuo que envolve forças de cisalhamento, alta pressão e alta temperatura por curto tempo (FELLOWS, 2006; VARGAS-SOLÓRZANO et al. 2014) e combina operações unitárias: cozimento, homogeneização, formação e moldagem, além de reduzir a contaminação microbiológica, inativar enzimas e diminuir a atividade de água do produto final (FELLOWS, 2006).

A extrusão é um processo de fácil operação, capaz de misturar ingredientes diversos, e transformá-los em novas estruturas alimentares com uma variedade de texturas, *flavor* e formas que atraem o consumidor. É uma tecnologia amplamente utilizada na produção de *snacks* expandidos, cereais matinais prontos para consumo, produtos de confeitaria, alimentos para animais de estimação, bem como diferentes produtos que estão dispostos na Tabela 1

(FAN, MITCHELL & BLANSHARD, 1996a; BERRIOS et al. 2010; BRENNAN et al. 2013; PITTS et al. 2014). A extrusão, também, permite a utilização e co-processamento de vários subprodutos da indústria alimentícia (SINGH, GAMLATH & WAKELING, 2007). A qualidade do produto final pode variar e depende da composição das matérias-primas utilizadas e de algumas variáveis dos parâmetros de extrusão, como a umidade da alimentação do processo, a temperatura do barril/canhão, diâmetro da matriz, a velocidade e o tipo do parafuso (FAN, MITCHELL & BLANSHARD, 1996b; BRENNAN et al. 2013).

Tabela 1 Exemplos de alimentos extrudados

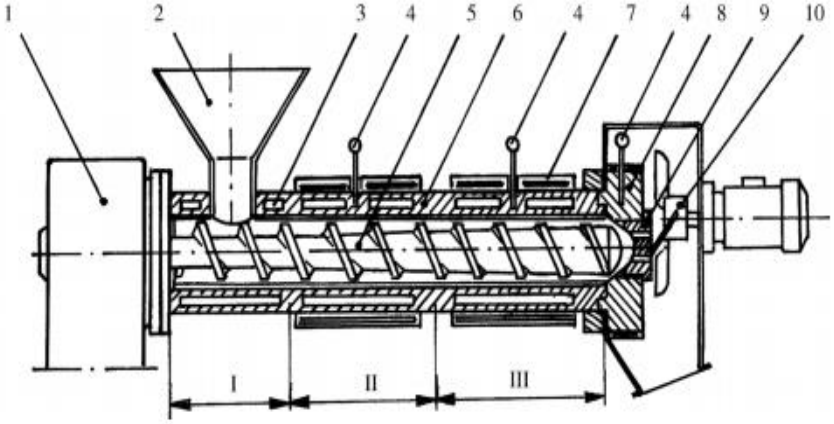
Tipo de produto	**Exemplos**
Produtos à base de cereais	Salgadinhos expandidos
	Cereais matinais expandidos e prontos para consumo
	Sopas e bases para bebidas, bebidas instantâneas
	Alimentos para desleitamento
	Amidos pré-gelatinizados e modificados, dextrinas
	Torradas e *croutons*
	Massas
	Farinhas compostas pré-cozidas
Produtos à base de açúcar	Goma de mascar
	Alçacuz
	Balas *toffee*, caramelos, confeitos de amendoim
	Gomas de frutas
Proteínas à base proteínas	Proteína vegetal texturizada (PVT)
	Rações semiúmidas ou expandidas para animais e suplementos proteicos
	Embutidos e salsichas
	Surimi
	Caseinatos
	Queijo processado

Fonte: Fellows (2006).

O equipamento de extrusão pode ser classificado de acordo com os tipos de parafuso utilizados: único parafuso ou duplo parafuso. O extrusor de rosca/parafuso único consiste de um alimentor, um parafuso que gira em um canhão cilíndrico encamisado, matriz e mecanismo de corte (Figura 4). O parafuso é acionado por um motor elétrico de velocidade variável potente para bombear o alimento contra a pressão gerada no canhão. A velocidade da rosca é um dos principais fatores que influenciam na efetividade do processo, pois afeta o tempo de residência do produto no extrusor, a quantidade de calor gerado, as taxas de transferência de calor e a força de cisalhamento aplicada sobre o produto (FELLOWS, 2006).

No interior do extrusor, a forma física da mistura de matérias-primas permanece inalterada na zona de alimentação. Quando a mistura atinge a zona de compressão ou cisalhamento, a configuração de parafuso oferece uma resistência ao escoamento, então empurram e comprimem a mistura transformando-a em uma massa densa entre a parede cilíndrica e o parafuso. Os elementos rodam, espremem e cortam a massa causando

aquecimento por fricção e danos mecânicos às partículas da mistura (HSIEH, PENG & HUFF, 1990).



1-motor, 2-alimentador, 3-revestimento de arrefecimento, 4-termopar, 5-parafuso, 6-barril/canhão, 7-revestimento de aquecimento, 8-Cabeça, 9-matriz, 10-cortador, I-zona de alimentação, II-zona de compressão, III-zona de fusão e alta pressão.

Figura 4 Uma secção transversal de uma extrusora de alimentos de um parafuso, adaptado (AJITA & JHA, 2017).

O princípio básico da extrusão é converter um material sólido em viscoso pela aplicação de calor e trabalho mecânico, e forçar sua saída através de uma matriz para formar um produto com características físicas e geométricas pré-determinadas (BORBA, SARMENTO & LEONEL, 2005). O parafuso gira constantemente dentro do barril durante a extrusão e os ingredientes são transportados através da ação de rotação do(s) parafuso(s), criando tanto forças de cisalhamento como arrasto ao longo do cano, geralmente em um fluxo laminar. Na extremidade do parafuso, o produto é forçado (a alta pressão e temperatura) para um orifício restritivo usualmente chamado de matriz, que pode conter diversos formatos (BRENNAN et al. 2013). A alta pressão que existe próxima à descarga da matriz é reduzida quando o produto sai do extrusor, causando a evaporação instantânea da água e a expansão do produto. A rápida evaporação da umidade do produto resulta em um resfriamento adiabático, ocorrendo sua solidificação ou endurecimento (BORBA, SARMENTO & LEONEL, 2005). A efetividade da expansão depende das propriedades reológicas e térmicas do material fundido e da geometria da matriz. O corte do extrudado é feito, normalmente por uma faca rotativa na parte exterior da matriz. (BRENNAN et al. 2013). O produto extrudado final passa a ter uma textura e expansão que são de grande importância para sua qualidade (BORBA, SARMENTO & LEONEL, 2005; THAKUR et al. 2017).

A expansão de um produto expandido pode ser medida pelo aumento percentual no diâmetro do produto após a extrusão em comparação com o tamanho da matriz (Figura 5). Uma maior expansão equivale a uma maior porosidade no produto. Geralmente, o produto extrudado tem um revestimento exterior mais resistente, que representa uma camada de bolhas colapsadas, e uma matriz interna expandida que compõe estas bolhas de ar. Os produtos extrudados altamente expandidos são menos densos do que os produtos não expandidos. O açúcar, o amido, o lipídio, o sal e as fibras alimentares podem contribuir para a alteração das propriedades físicas dos produtos extrudados (BRENNAN et al. 2013).

Figura 5 Diagrama esquemático da expansão do extrudado, segundo Chávez (2013).

Em tratamentos termomecânicos de baixa umidade, como a extrusão, os componentes de amido e proteína sofrem modificações moleculares, como, a hidratação, fragmentação do amido, desnaturação e reorientação de proteínas, além de ocorrer fusão de lipídios, formação de uma massa viscoelástica contínua e expansão da estrutura do alimento (SINGH, GAMLATH & WAKELING, 2007; VARGAS-SOLÓRZANO et al. 2014; THAKUR et al. 2017). Os efeitos da extrusão sob a qualidade dos nutrientes podem ser positivos ou negativos, dependendo das variáveis do processo, e afetam a biodisponibilidade e a bioacessibilidade dos nutrientes em comparação com o cozimento convencional. (BRENNAN et al. 2013). Os efeitos benéficos no alimento incluem destruição ou diminuição de fatores antinutricionais, a digestibilidade do amido, aumento do teor de fibra alimentar solúvel e a redução da oxidação lipídica. No entanto, as reações de Maillard entre proteínas e açúcares reduzem o valor nutricional da proteína, dependendo do tipo de matéria-prima e sua composição. As vitaminas termolábeis e os polifenois podem ser perdidos em diferentes proporções. Alterações no perfil de proteínas, aminoácidos, carboidratos, fibras dietéticas, vitaminas, conteúdo mineral, podem ser benéficas ou prejudiciais dependendo da finalidade do produto final (SINGH, GAMLATH & WAKELING, 2007; MAKARAVICIUS et al. 2012).

A capacidade de modificar a estrutura molecular e a funcionalidade do amido e proteína é de grande interesse para a indústria de alimentos, tanto para criar produtos com propriedades de digestibilidade dos nutrientes conhecidas quanto para produzir novas estruturas e texturas, que atendam às expectativas do consumidor. (BRENNAN et al. 2013).

A extrusão possui vantagens tecnológicas frente a processos convencionais de cozimento, são eles:

- A ampla variedade de produtos é possível pela alteração de ingredientes, condições de operação da extrusora e forma da matriz;
- A extrusão possui custos de processamento menores e maior produtividade do que outros processos de cozimento ou modelagem;
- As extrusoras funcionam continuamente e apresentam altas taxas de produção, além de processos automatizados;

- O cozimento por extrusão envolve altas temperaturas aplicadas a curto tempo (HTST), mantendo alguns componentes termossensíveis, melhorando a qualidade nutricional do produto;
- É um processo de baixa umidade que não produz efluente. Isso elimina os custos de tratamento de água e não cria problemas de poluição ambiental (FELLOWS, 2006).

Durante a extrusão, os grânulos de amido semicristalino perdem parcialmente ou totalmente as estruturas cristalinas organizadas, sofrem alteração na integridade dos grânulos e são transformados em uma massa fundida, viscoelástica e coesiva que rege a expansão do produto extrudado à medida que o material passa pela matriz e atinge a temperatura e a pressão atmosférica (FAN et al. 1996b; SINGH, DARTOIS & KAUR, 2010; PITTS et al. 2014). Além disso, os amidos fundidos podem formar um complexo de amilose-lipídio ao arrefecer. Estas alterações explicam a grande variação das propriedades funcionais e de textura dos extrudados (FAN at al. 1996b). Diferentes composições de amilose/amilopectina e a morfologia dos grânulos de amido de diferentes fontes de cereais podem contribuir para as diferenças no processamento por extrusão e nas propriedades físico-químicas dos extrudados (BORBA, SARMENTO & LEONEL, 2005; PITTS et al. 2014).

A digestibilidade da proteína dos extrudados é maior do que os produtos não extrudados. A possível causa pode ser a desnaturação de proteínas e a inativação de fatores antinutricionais (inibidores de tripsina, taninos e fitatos) que prejudicam a sua digestão (SINGH, GAMLATH & WAKELING, 2007). Além destes fatores, a fragmentação das paredes celulares do endosperma vítreo e, consequente, expansão do amido, expõe às proteínas a hidrólise enzimática no trato digestivo (DE MESA-STONESTREET, ALAVI & BEAN, 2010).

2.3 Efeitos do açúcar na extrusão

A sacarose, usualmente conhecida como açúcar ou açúcar branco, é um oligossacarídeo que contém 2 unidades de aglicona, unidas por ligações glicosídicas. Ela é composta por uma unidade de α-D-glicopiranosil (glicose) e uma unidade de β-D-frutofuranosil (frutose) ligadas pelas extremidades redutoras das duas moléculas. Pelo fato de não ter nenhuma extremidade redutora livre, a sacarose é classificada como um açúcar não redutor. Por ser um carboidrato de baixa massa molecular possui grande hidrofilicidade (afinidade por água) e solubilidade. As duas principais fontes de sacarose comercial são: a cana de açúcar e a beterraba açucareira (FENNEMA, PARKIN & DEMODARAN, 2010).

A adição de açúcar na formulação de produtos expandidos, tais como cereais matinais e *snacks*, é, principalmente, para melhorar as propriedades sensoriais e contribuir para as características de processamento e qualidade de textura do produto, devido à funcionalidade físico-química específica de cada ingrediente (SINGH, GAMLATH & WAKELING, 2007; PITTS et al. 2014).

A adição de açúcares aumenta a densidade aparente do produto e resulta numa redução na expansão e tamanho dos poros de produtos extrudados (BARRETT et al. 1995; CARVALHO & MITCHELL, 2000; PITTS et al. 2014). Como consequência, também afeta as propriedades de ruptura mecânica e suas propriedades sensoriais. Acredita-se que as alterações ocasionadas pelo açúcar sejam devidas o efeito co-soluto do açúcar para competir com o amido por água (PITTS et al. 2014) e o efeito de plastificante do açúcar nos polissacarídeos de amido (FAN, MITCHELL & BLANSHARD, 1996a). A redução da expansão e o aumento da densidade nos extrudados ocorrem devidos a dois fatores:

- A reologia da parede das bolhas apresenta uma forma mais coloidal e menos polimérica, tornando-as mais fracas, conforme o grau de conversão de amido diminui. Há uma redução no teor de polímeros e os emaranhados entre os

polissacarídeos são reduzidos devido à baixa conversão de amido. A consequência da parede de bolha mais fraca é que ocorre ruptura das bolhas em graus mais baixos de extensão.

- Há um maior grau de encolhimento ao sair da matriz de extrusão devido à viscosidade reduzida. O açúcar diminui a viscosidade da massa fundida na extrusão, e consequentemente a energia mecânica específica (EME), essa última desempenha um papel importante na conversão de amido durante o processo de extrusão (FAN et al. 1996b; CARVALHO & MITCHELL, 2000; PITTS et al. 2014).

Fan, Mitchel e Blanshard (1996a), ao estudar o efeito de diversos monossacarídeos e dissacarídeos, em concentrações diferentes na extrusão do milho, mostraram que um aumento no teor de plastificantes de baixo peso molecular, isto é, água e açúcares na massa para extrusão diminui a temperatura de transição vítrea (Tg), e, consequentemente a viscosidade. Essa redução da viscosidade de fusão diminuirá a conversão de energia mecânica em energia térmica, reduzindo a temperatura do extrudado no molde e, portanto, a força motriz (a diferença de pressão entre o interior da bolha e a pressão atmosférica) para o crescimento de bolhas e a redução da extensão da parede de bolha antes de romper, favorecendo o encolhimento do produto final. Além disso, a redução da EME, associada à diminuição da Tg reduz o grau de conversão de amido, que, por sua vez, gera paredes de bolhas menos extensíveis que levam a um menor grau de expansão.

Sabe-se que o açúcar afeta a estrutura e a textura dos extrudados, no entanto, os achados de tais efeitos variaram de acordo com a concentração e o tipo de açúcar adicionado, o teor de umidade da farinha para extrusão e o cereal utilizado para produzir os mesmos. Ao comparar a adição de açúcar em extrudados de farinha de trigo e de grits de milho, percebem-se efeitos diferentes. Para o grits de milho, notou-se uma redução significativa (nível 0,1%) da expansão e da energia mecânica específica, principalmente com o aumento do teor de água, porém esses efeitos não foram significativos (5,0%) para a farinha de trigo (CARVALHO & MITCHELL, 2000). Mezreb et al. (2006), verificaram que sacarose exerceu efeitos pronunciados tanto na estrutura dos extrudados de milho quanto no de trigo, e que houve uma redução na expansão dos extrudados, de forma mais pronunciada no milho do que no trigo. Comprovando que os efeitos da adição de açúcar em cereais podem variar com a fonte amilácea utilizada na extrusão.

Fan, Mitchel e Blanshard (1996a) mostrou que os monossacarídeos têm maior efeito que os dissacarídeos na expansão seccional e posterior encolhimento dos extrudados de grãos de milho, com consequente aumento na densidade. No entanto, resultados opostos, também, foram relatados por Hsieh et al. (1990), que observaram que a adição de concentrações de açúcar (0-4%) diminuíram os parâmetros de processamento de extrusão: torque, energia mecânica específica e pressão da matriz, porém as concentrações maiores de açúcar (4-8%) resultaram no aumento dos parâmetros de extrusão, aumento nas expansões radiais e axiais e redução na densidade aparente, à uma velocidade de parafuso de 200 rpm. Esses resultados podem ser explicados pelo aumento da viscosidade de fusão do material, pois dependendo da concentração de açúcar utilizada e teor de umidade, espera-se o aumento da viscosidade devido o efeito de inchamento dos cristais de açúcar antes da fusão: O açúcar amorfo adsorve a água enquanto que o açúcar cristalino não e, deste modo, antes da fusão dos cristais de açúcar a maior parte da água divide a fase de amido reduzindo a sua viscosidade e, consequentemente, a EME, porém em níveis de açúcar mais baixos, a quantidade de água para dividir o sistema em uma fase de amido será pequena não impactando a viscosidade do material (CARVALHO & MITCHELL, 2000).

O efeito do açúcar no processamento de *snacks* a base de sorgo integral é pouco conhecido. Mkandawire et al. (2015) estudaram a potencial utilização de diferentes

proporções de dois genótipos de sorgo integral (vermelho, com tanino e branco, sem tanino) em mistura com farinha de milho, para produzir em cereais matinais. Os cereais de sorgo vermelho apresentaram maior densidade aparente comparado ao extrudado de sorgo branco, notou-se, também, maior densidade aparente conforme o aumento do teor de sorgo na formulação do cereal matinal, provavelmente devido ao efeito limitante da fibra na expansão do extrudado. O uso de sorgo branco (sem tanino) em cereais matinais resultou em propriedades sensoriais semelhantes ao cereal matinal de aveia (controle), com melhor aceitabilidade pelos consumidores quando comparado ao extrudado de sorgo vermelho.

Anunciação et al. (2017), ao comparar a aceitabilidade sensorial de cereal matinal de sorgo integral e cereal matinal de trigo integral, ambos com 10% de açúcar e 0,5% de NaCl em sua formulação, registrou melhor aceitação do cereal de sorgo (70,6%) em detrimento ao cereal de trigo (41,18%), além disso, o sorgo apresentou 98,2% a mais de compostos fenólicos totais, evidenciando o seu potencial benefício à saúde do consumidor.

Segundo Vargas-Solórzano et al. (2014), diferentes genótipos de sorgo, com pericarpo branco, vermelho e marrom apresentam comportamentos distintos quando processados em extrusão termoplástica, devido a composições químicas, conteúdo de fibra e taninos diferentes entre os genótipos. Essa diferença de comportamento pode ser compreendida nas propriedades físico-químicas dos extrudados, como expansão, absorção e solubilidade em água, bem como em densidade aparente e viscosidade, e em variáveis de extrusão, como a energia mecânica específica. Esses resultados refletem diferenças na conversão do amido durante a extrusão de diferentes genótipos de sorgo, no entanto não há registros na literatura que esclareça o comportamento de diferentes genótipos de sorgo na extrusão termoplástica, em presença de ingredientes, como o açúcar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local de execução

O estudo foi realizado na Embrapa Agroindústria de Alimentos (Rio de Janeiro, RJ). O processo de extrusão e as análises físicas foram realizados na planta piloto IV e as análises químicas foram realizadas nos laboratórios da planta piloto II, da planta piloto V e ASA 3.

3.2 Matéria-prima

3.2.1 Sorgo

Foram utilizados grãos integrais de seis genótipos de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] fornecidos pela Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas, MG): BR 305 e SC 319 (pericarpo marrom), BRS330 e BRS 373 (pericarpo vermelho), BRS 501 e CMSS 005 (pericarpo branco). Os grãos, acondicionados em sacolas de plástico, foram armazenados em temperatura de refrigeração até a utilização dos mesmos.

3.2.2 Insumos

Para estudar o efeito do açúcar na extrusão de sorgo integral, foram utilizados açúcar refinado (Guarani) e sal marinho refinado (Cisne), ambos adquiridos em mercado local do Rio de Janeiro.

3.3 Métodos

3.3.1 Caracterização química da matéria-prima

Os grãos integrais de sorgo foram limpos em equipamento de limpeza de grãos modelo Sintel (Intecnial S.A., Erechim, Brasil). Após, os grãos foram passados em moinho de discos (MD) LM3600 (Perten Instruments AB, Huddinge, Suécia) com abertura n°2 entre discos e, em seguida no moinho de martelos e facas (MMF) LM3100 (Perten Instruments AB, Huddinge, Suécia) equipado com peneira de 0,8 mm de abertura, para atingir um tamanho de partícula desejável para as análises.

3.3.1.1 Umidade

Determinado através do método Am 5-04 da AOCS – American Oil Chemists Society (2009).

3.3.1.2 Proteínas

Determinado pelo método Kjeldahl, descrito pela AOAC - Association of Official Agricultural Chemists (2010). O fator F=5,75 foi utilizado para converter o nitrogênio total em proteína total.

3.3.1.3 Lipídios

O extrato etéreo foi quantificado utilizando o extrator Soxhlet, segundo o método 963.15 da AOAC (2010).

3.3.1.4 Cinzas

O teor de cinzas foi determinado por analisador termogravimétrico (TGA) a 550 °C (peso constante).

3.3.1.5 Carboidratos totais

Calculado por diferença, como descrito pela RDC n° 360 de 23 de dezembro de 2003 (BRASIL, 2003).

3.3.1.6 Fibra alimentar

Utilizou-se o método enzimático-gravimétrico 985,29 da AOAC (2010).

3.3.1.7 Composição em minerais

Foram quantificados, em duplicata, os seguintes minerais ($mg.100g^{-1}$): sódio (Na), potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca), manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), fósforo (P) e cromo (Cr). A mineralização foi realizada por micro-ondas de cavidade, método 999,10, item 9.1.08 (AOAC, 2005). A quantificação foi efetuada pelo método 990,08, item 9.2.39 (AOAC, 2005).

3.3.2 Preparo e acondicionamento das farinhas cruas

Os grãos de sorgo, previamente limpos e armazenados à temperatura de refrigeração foram moídos em moinho de discos (MD), ajustado em abertura nº 2, obtendo-se a farinha de sorgo integral. Para cada genótipo de sorgo formulou-se uma farinha sem açúcar e uma farinha com açúcar, ambas contendo sal de cozinha refinado (NaCl) e respeitando as seguintes proporções: 10% de açúcar e 0,5% de sal, em uma massa total de farinha de extrusão de 500 g. Desta forma obteve-se assim 12 tratamentos para a extrusão, conforme Tabela 2. As farinhas cruas de sorgo com/sem o açúcar e sal foram homogeneizadas em um batedor de massas alimentícias, durante 10 min. A umidade das farinhas para extrusão foi determinada pelo método gravimétrico, segundo 925,09 da AOAC (2010), em duplicata. Foram pesados 2 ± 0,0005 g de farinha para extrusão, após foram secos a 105 °C em estufa, até peso constante (Figura 6).

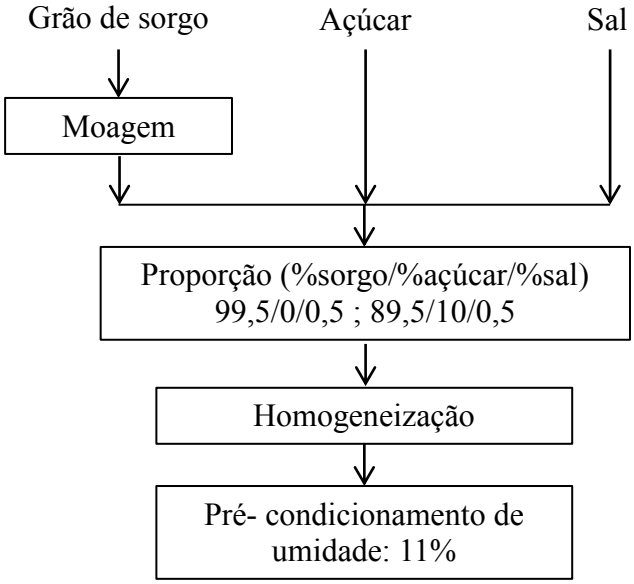


Figura 6 Fluxograma de preparo das farinhas para extrusão

Tabela 2 Tratamentos para extrusão

Cultivar	Tratamento A	Tratamento B
	99,5% de sorgo e 0,5% de sal	89,5% de sorgo, 10% de açúcar e 0,5% de sal
BR 305	T1	T7
BRS 501	T2	T8
BRS 330	T3	T9
BRS 373	T4	T10
SC 319	T5	T11
CMSS 005	T6	T12

Após a determinação da umidade, adicionou-se água destilada nas misturas para obter farinhas com a umidade de 11%, estabelecida por delineamento dos parâmetros de extrusão. A quantidade de água (W) a ser adicionada, em mL, em cada farinha foi calculada pela equação (1):

$$W = \frac{(U_f - U_i) \times Pa}{100 - U_f}$$

Onde, U_f é a umidade final da amostra (%), U_i é a umidade inicial da amostra (%) e Pa é a massa total de amostra (g).

3.3.3 Distribuição granulométrica das farinhas integrais de sorgo

A distribuição granulométrica da farinha de cada genótipo de sorgo foi realizada segundo Vargas-Solórzano et al. (2014), em triplicata. Separou-se 100 g das farinhas de cada genótipo de sorgo integral que foi moído segundo o item 3.3.2. A farinha de cada genótipo foi armazenada no topo de peneiras de aço inox padronizadas (Newark, EUA) e peneiradas, por 10 min em ROTAP RX-29-10 (W.S. Tyler, St. Albans, EUA). Selecionaram-se sete aberturas de peneira (1,68; 1,4; 1,18; 1,00; 0,71; 0,3; 0,106 mm e um fundo), a fim de obter uma distribuição normal das partículas. As frações retidas no topo de cada peneira foram pesadas em balança semianalítica e o cálculo de partículas retidas (R_n) em g.100 g^{-1}, foi realizado com a equação (2).

$$R_n = \frac{m_r}{m_p} x\ 100 \quad (2)$$

Onde, n indica a abertura de peneira, em mm; m_r é a massa da peneira n com produto retido e m_p é a massa da peneira vazia.

3.3.4 Condições de processamento de extrusão

Para obter os extrudados, utilizou-se um extrusor monorosca (parafuso único) da marca Brabender (Duisburg, Alemanha), modelo DSE 20DN, equipado com matriz circular

de 3 mm, taxa de compressão de parafuso único 5:1, velocidade de rotação do parafuso de 250 rpm e taxa de alimentação do extrusor de 15 rpm. O extrusor possui três zonas de aquecimento, onde as temperaturas das zonas 1, 2 e 3 foram mantidas constantes a 50, 90 e 120 ºC. A extrusão de cada amostra foi iniciada após a estabilização do fluxo de processamento, monitorado pela variação do torque e pelas temperaturas das três zonas de aquecimento. Os extrudados foram coletados manualmente, em tamanhos, aproximados, de 30 cm de comprimento. O material foi seco em estufa com circulação de ar a 60 ºC por 4 h, em seguida resfriado à temperatura ambiente. Após, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente etiquetados e armazenados sob temperatura ambiente para posteriores análises. O processamento de extrusão foi realizado em duplicata.

3.3.5 Variáveis do processo de extrusão

3.3.5.1 Vazão ou fluxo mássico de extrusão

A determinação da vazão do processamento de extrusão foi realizada coletando, em sacolas de plástico, uma quantidade de massa extrudada na saída da matriz durante 30 s. A massa coletada foi registrada em balança semianalítica. O cálculo do fluxo mássico (V), em kg.h^{-1} foi realizado de acordo com a equação (3):

$$V = \frac{m}{t}\left(\frac{3600}{1000}\right) \qquad (3)$$

Onde, m é a massa da amostra coletada, em g; e t é o tempo de coleta, em segundos (s).

3.3.5.2 Energia mecânica específica (EME)

O torque, em (Nm), a velocidade do parafuso (em rpm) e as temperaturas em cada zona de aquecimento e na saída da extrusão, em (ºC) foram registradas pelo software WinExt (CAN). A energia mecânica específica foi calculada de acordo com Fan, Mitchell, e Blanshard (1996b), usando a equação (4):

$$EME = \frac{T \times 2\pi F' \times n}{\left(\frac{Q}{60}\right)} \qquad (4)$$

Onde T é o torque gerado pelos parafusos, em kJ (registrado em Nm no software e convertido a kJ multiplicando por 0,001). F' é a frequência de rotação dos parafusos, em rpm n é o número de parafusos; e Q é a taxa de fluxo mássico de extrudado, em kg.h^{-1}.

3.3.6 Propriedades físicas dos extrudados

3.3.6.1 Índice de expansão e densidade aparente

O índice de expansão radial (IER) dos extrudados foi determinado segundo a metodologia de Alvarez-Martinez, Kondury e Harper (1988). O índice de expansão radial foi realizado medindo o diâmetro, com paquímetro manual de 150 mm (Vonder, Curitiba, Brasil), nos extremos e ao centro de cada peça cilíndrica de extrudado. Dez peças foram medidas para cada tratamento de extrusão, em duplicata. Para o cálculo de IER utilizou-se a equação (5):

$$IER = \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \qquad (5)$$

Onde D_0 é o diâmetro da matriz da saída do extrusor (3,0 mm) e D é a média dos diâmetros aferidos por paquímetro de uma peça cilíndrica de extrudado após resfriamento.

Registrou-se a massa de vinte extrudados, medindo, aproximadamente cinco mm de comprimento, em balança analítica e calculou-se a densidade aparente (ρ_a) do extrudado, em g/cm³ utilizando a equação (6), segundo Fan, Mitchell e Blanshard (1996b):

$$\rho_a = \frac{4 \times m}{\pi \times D^2 \times L} \qquad (6)$$

Onde, m é a massa (em g) de uma peça cilíndrica de extrudado de comprimento L (em mm), medido em paquímetro e D é a média dos diâmetros aferidos por paquímetro de uma peça cilíndrica de extrudado após resfriamento.

3.3.6.2 Índice de solubilidade em água (ISA) e índice de absorção de água (IAA)

As determinações de ISA e IAA foram realizadas segundo a metodologia descrita por Anderson, Conway e Peplinski (1969), com modificações. As amostras foram, previamente, peneiradas em peneiras com aberturas de 0,212 mm, 0,106 mm e fundo. Pesou-se cerca de 1 g de amostra retida em peneira de 0,106 mm, em tubos Falcon, previamente tarados. Adicionou-se 10 mL de água destilada aos tubos os quais foram agitados em agitador mecânico tipo vórtex para homogeneização completa das amostras. Em seguida, para promover a hidratação completa das amostras, os tubos foram colocados em descanso sobre bancada por aproximadamente 30 minutos. Após, as amostras foram centrifugadas a 3000 rpm por 15 min. Os líquidos sobrenadantes foram transferidos para pesa-filtros previamente tarados e submetidos ao processo de secagem em estufa com circulação de ar a 105 °C até peso constante.

Os pesa-filtros foram pesados e o *ISA* foi encontrado pela relação do peso do resíduo evaporado (g) pelo peso inicial da amostra (g), segundo equação (7):

$$ISA = \frac{Peso\ do\ resíduo\ após\ evaporação\ (g)}{Peso\ inicial\ da\ amostra\ (g)} \times 100 \qquad (7)$$

Após a retirada do líquido sobrenadante, pesou-se os tubos Falcon e calculou-se o *IAA* (g gel/g amostra seca), de acordo com relação do peso do resíduo centrifugado (g) pelo peso inicial da amostra (g), segundo equação (8):

$$IAA = \frac{Peso\ do\ resíduo\ úmido\ gel\ (g)}{Peso\ inicial\ da\ amostra\ em\ base\ seca\ (g)} \qquad (8)$$

3.3.6.3 Determinação da viscosidade de pasta

Os perfis de viscosidade de pasta foram determinados em duplicata para cada tratamento, utilizando o analisador rápido de viscosidade (*Rapid Visco Analyser* RVA – Series 4) (Newport Scientific, Warriewood, Austrália), provido de *software Termocline for Windows*. O perfil de viscosidade de pasta para cada tipo de farinha extrudada, com granulometria >0,212 mm e ≤ 0,106 mm, foi medida utilizando 3,0 g (±0,1) de amostra e 25,0 g (±0,1) de água destilada, ajustando o teor de umidade a 14% de base úmida. O perfil de análise "extrusion 1 no-alcohol" foi utilizado, no qual as amostras foram mantidas a 25 °C por 2 min, aquecidas até 95 °C a uma velocidade constante de 14 °C/min e mantidas a 95 °C por 4 min, e depois resfriadas a 25 °C e mantidas por 5 min, com uma duração total de análise de 20 min, sob agitação à 160 rpm. Para a interpretação dos resultados foram avaliados os seguintes

parâmetros: a viscosidade máxima inicial a 25 ºC (V_i), viscosidade máxima a 95 ºC (V_{max}), viscosidade mínima após atingir a viscosidade máxima (V_{min}) e viscosidade final (V_{final}). A quebra de viscosidade (QV) ou *Breakdown* e a tendência à retrogradação (TR) ou *Setback* foram calculadas com as equações (9) e (10), respectivamente.

$$QV = V_{max} - V_{min} \qquad (9)$$

$$TR = V_{final} - V_{min} \qquad (10)$$

Todos estes parâmetros são apresentados em gráficos de picos de viscosidade (V), em cP, ao longo do tempo de análise, em minutos, conforme Figura 7.

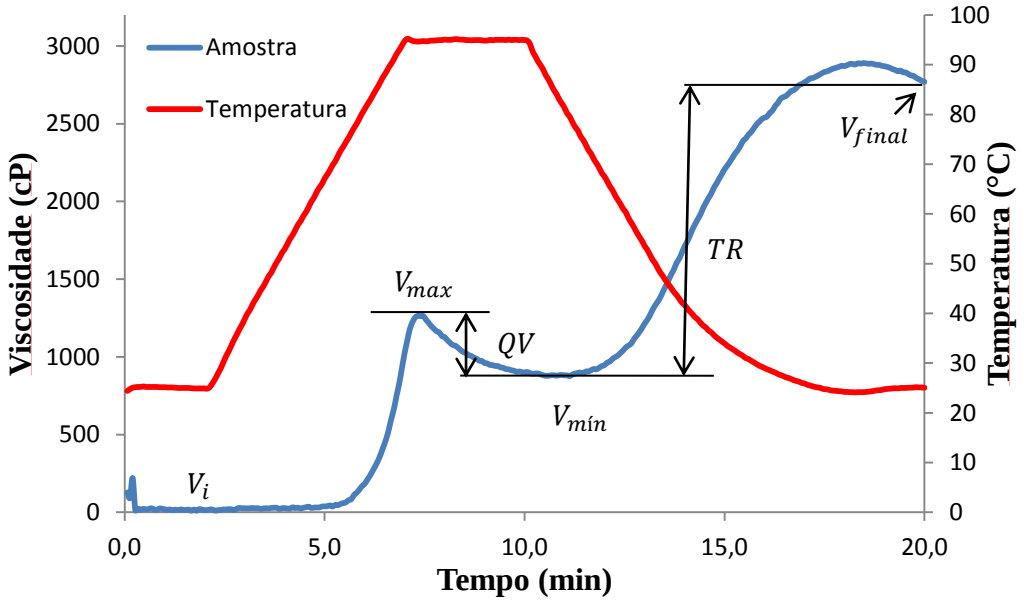


Figura 7. Curva de viscosidade de pasta de uma farinha crua de sorgo integral, com agitação constante e perfil de temperatura de aquecimento-resfriamento

3.3.6.4 Determinação de cor

Os extrudados secos foram moídos de acordo com o item 3.3.1. A cor das farinhas dos extrudados de cada tratamento, foi realizada por refletância diretamente no pó em quatro posições diferentes usando um colorímetro Color Quest XE (Hunter Associates Laboratory Inc., Reston, EUA), escala CIELAB e CIELCh, com abertura de 25 mm de diâmetro, com iluminante D 65/10° e especular excluída. As amostras foram dispostas em cubeta de quartzo de 10 mm. A cor foi registrada usando uma escala CIE-L*a*b* (CIE-Lab).

Os parâmetros de cor medidos foram:

L* = luminosidade (0 = preto e 100 = branco);

a* (-80 até zero = verde, do zero ao +100 = vermelho);

b* (-100 até zero = azul, do zero ao +70 = amarelo);

C* chroma; $\sqrt{a^2 + b^2}$ define a intensidade ou saturação de cor, sendo definido pela distância do ângulo hue no centro do diagrama tridimensional. Valores próximos a zero são indicativos de cores neutras (branco e/ou cinza) e valores ao redor de 60 indicam cores vívidas e/ou intensas, segundo Fernandes et al. (2010);

h° ângulo hue = arctan (b*/a*) mostra a localização da cor em um diagrama tridimensional, onde o ângulo 0° representa o vermelho puro, o 90° representa o amarelo puro, o de 180° o verde puro e o 270° o azul, de acordo com Mcguire (1992).

O índice do branco (WI) foi calculado de acordo com equação (11):

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2} \qquad (11)$$

3.3.7 Propriedades mecânicas dos extrudados

A textura instrumental dos extrudados de sorgo foi determinada segundo a metodologia descrita por Bouvier, Bonneville e Goullieux (1997). As amostras utilizadas na determinação do índice de expansão radial (IER) foram secas em forno com circulação de ar (WTB Binder, Tuttlinger, Alemanha) a 60 ºC, até atingir uma umidade aproximada de 4%. Após, as amostras foram resfriadas em dessecador até temperatura ambiente. As propriedades mecânicas dos extrudados foram medidas usando o teste de punctura utilizando um analisador de textura TA-XT Plus (Stable Micro Systems, Surrey, Inglaterra), equipado com uma carga de 50 kg, na qual foi acoplada uma sonda cilíndrica de aço inox de 2 mm de diâmetro. A umidade relativa do ar durante a análise foi de 70%. A sonda desceu a 5 mm.s^{-1}, quando atingiu uma força de contato de 0,196 N sob a amostra, a perfuração se iniciou a 1 mm.s^{-1} até o 50% do diâmetro do extrudado. Após, a sonda subiu a 10 mm.s^{-1} até uma altura de 20 mm. Foram realizadas 26 perfurações por cada tratamento de extrusão. Geraram-se gráficos de picos de forças de compressão, que foram registrados por *software* Exponent versão 4.0.13.0 (Stable Micro Systems, Surrey, Inglaterra), segundo Figura 8.

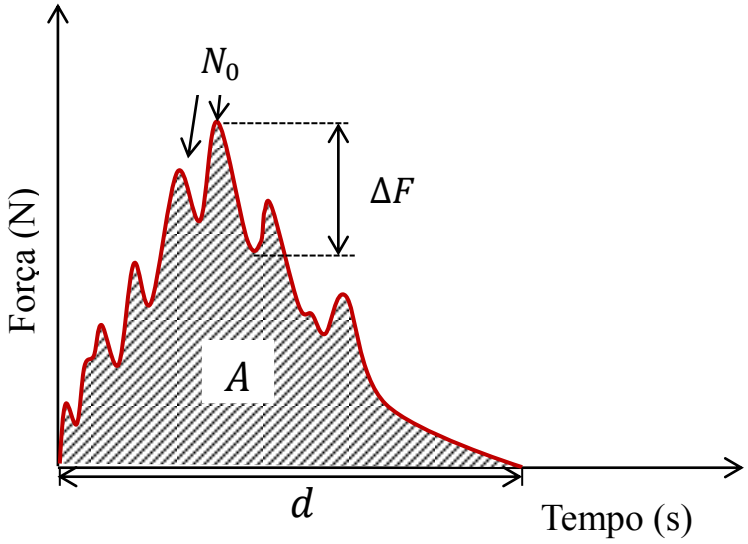


Figura 8 Representação gráfica das forças de compressão aplicada a um extrudado.

A partir dos dados gerados por *software*, pôde-se calcular o grau de crocância dos extrudados segundo as equações (12) a (15):

A Frequência de rupturas (N_{sr}), em mm^{-1}, foi calculada segundo a equação (12):

$$N_{sr} = \frac{N_0}{d} \qquad (12)$$

Onde, N_0 é o número total de picos e d é a distância de compressão do extrudado, em mm.

A Média da força específica de rupturas estruturais(F_{sr}), em N, foi calculada com a equação (13):

$$F_{sr} = \sum \frac{\Delta F}{N_0} \qquad (13)$$

Onde, ΔF é a força de queda aplicada que foi gerada em cada pico, em N.

A média das forças de compressão F_c , em N, foi calculada segundo a equação (14):

$$F_c = \frac{A}{d} \qquad (14)$$

Onde, A é área sob a curva de forças de compressão, em mm², e d é a distância de compressão do extrudado, em mm.

O trabalho de crocância W_c, em N.mm foi calculado com a equação (15):

$$W_c = \frac{A}{N_{sr}} \qquad (15)$$

3.3.8. Quantificação de compostos fenólicos totais (CFT)

3.3.8.1 Extração de compostos fenólicos totais

A extração dos compostos fenólicos totais foi realizada nos grãos integrais de sorgo moídos e nas farinhas dos extrudados, segundo a metodologia de Saura-Calixto e Goñi (2006), com modificações. Pesou-se 1,0 ± 0,0005 g de amostra moída em tubo Falcon de 15 mL e adicionou-se 7 mL de metanol 50% (v/v), homogeneizou-se em vortex, modelo Genie 2 (Scientific Industries, Bohemia, EUA), seguido de repouso por duas horas, à temperatura ambiente. Após, centrifugaram-se os tubos em centrífuga, modelo 215 (Fanem, São Paulo, Brasil), a 200 rpm, por 15 min e transferiu o sobrenadante para outros tubos Falcon de 15 mL. Adicionou-se 7 mL de acetona 70% (v/v) no material decantado, homogeneizou-se em Vortex, seguido por repouso à temperatura ambiente, por duas horas. Centrifugaram-se os tubos, novamente, a 2000 rpm, por 15 min. O sobrenadante da segunda centrifugação foi transferido para o tubo contendo o sobrenadante da primeira etapa. As alíquotas foram filtradas em papel de filtro quantitativo C41(faixa preta) 110 mm e, em seguida completou-se o volume das amostras filtradas com água destilada. As amostras foram armazenadas em temperatura de refrigeração para posteriores análises. As extrações foram realizadas em triplicata.

3.3.8.2 Quantificação de compostos fenólicos totais

A quantificação dos compostos fenólicos totais foi realizada segundo metodologia de Chávez et al. (2017), com modificações. Utilizou-se o reagente Folin-Ciocalteau e uma curva de calibração de ácido gálico (0,0101 g em 10 mL de acetona 7%/metanol 50%). Para essa curva utilizaram-se as seguintes concentrações: 2,0; 1,5; 1,0; 0,5 0,25; 0,125; 0,0625 mg de ácido gálico /mL. Tanto para o ácido gálico quanto para as amostras, utilizou-se 10 μL de extrato, adicionados de 790 μL de água e 50 μL de Folin-Ciocalteau, esse último adicionado sobre agitação. Após 2 min, adicionou-se 150 μL de solução de carbonato de sódio 10% (p/v). A mistura foi mantida em banho-maria a 50 °C durante 15 min. A absorbância foi medida a 760 nm utilizando um espectrofotómetro UV-1800 (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japão), sendo os valores encontrados expressos em mg equivalentes de ácido gálico.$100g^{-1}$.

3.3.9 Taninos condensados

A extração e quantificação de taninos condensados em grãos de sorgo integral e em extrudados de sorgo fora realizadas segundo as metodologias de Burns (1971) e Deshpande e Cheryan (1985), com modificações. A extração de taninos foi realizada utilizando 0,6 a 6 g de

amostras, dependendo do genótipo de sorgo, com 15 mL de solução HCl/metanol a 10% (v/v) em tubo Falcon de 25 mL. A mistura foi homogeneizada em Vortex Genie 2 (Scientific Industries, Bohemia, EUA) por 1 min, seguido por banho de ultrassom em Branson 2210 (VWR Scientific, Bridgeport, EUA), durante 10 min. A mistura foi mantida em refrigeração por 16 h, em seguida foi filtrada em papel de filtro quantitativo C41(faixa preta) 110 mm e transferida para balão volumétrico de 25 mL, obtendo-se, assim o extrato para quantificação de taninos condensados. A extração foi realizada em triplicata.

Em um tubo de ensaio adicionou-se: 1 mL de extrato e 5 mL de vanilina a 4% (p/v) em solução de HCl/metanol a 10% (v/v). Utilizou-se 1 mL de solução HCl/metanol a 10% (v/v) e 5 mL de vanilina a 4% (p/v) em solução de HCl/metanol a 10% (v/v) como o branco do espectrofotômetro e 1mL de extrato com 5 mL de solução de HCl/metanol a 10% (v/v) como branco de cada leitura. Após 20 min de reação, as cores resultantes foram lidas em espectrofotómetro UV-1800 (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japão) a 500 nm. Os taninos condensados foram quantificados usando uma curva de calibração de catequina [15 mg de catequina em 5 mL de metanol 80% (v/v)]. Para a leitura dos pontos da curva de calibração consideraram-se as seguintes concentrações de catequina: 0; 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5 e 1,8 mg/mL. Os resultados foram expressos em mg de catequina/100g de amostra.

3.4 Delineamento experimental

Um delineamento inteiramente ao acaso (DIC) com arranjo fatorial 6x2, onde 6 = fator A (genótipo) e 2 = fator B (% de açúcar = 0 ou 10), foi utilizado para avaliar o efeito das variáveis respostas, representado pelo modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Onde:
i = 1,2,3,4,5,6 níveis de genótipos de sorgo;
j = 1,2 níveis de % de açúcar;
k = 1 e 2 repetições;
Y_{ijk} = variável resposta;
μ = efeito médio comum;
α_i = efeito do i-ésimo nível de genótipo de sorgo;
β_j = efeito do j-ésimo nível de % de açúcar;
$(\alpha\beta)_{ij}$ = efeito de interação entre o i-ésimo genótipo de sorgo e j-ésima % de açúcar;
ε_{ijk} = variação do erro aleatório associado à ijk-ésima unidade experimental.

Aplicou-se a análise de variância (ANOVA) para detectar se houve diferença significativa entre os tratamentos estatísticos. Onde houve tal diferença, utilizou-se o teste de Tukey para detectar os tratamentos diferentes. Para todos os casos utilizou-se um nível de significância α = 0,05.

Para a análise de quantificação de taninos condensados utilizou-se o teste t para as amostras independentes na comparação dos genótipos BR 305 e SC 319 e para as amostras pareadas quando foi adicionado açúcar em BR 305.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da matéria prima

4.1.1 Composição centesimal

Os resultados de composição química dos diferentes genótipos de sorgo avaliados são apresentados na Tabela 3. Segundo Cardoso et al. (2015), a composição química e valor nutricional do sorgo integral são similares ao arroz, milho e trigo.

A proteína, nos genótipos de sorgo variou de 9,37 a 10,32 $g.100g^{-1}$. O conteúdo de cinzas variou de 1,28 a 1,94 $g.100g^{-1}$. O teor de extrato etéreo variou de 2,19 a 3,67 $g.100g^{-1}$, esse último valor é correspondente ao genótipo BRS 501 (pericarpo branco) e apresentou diferença significativa ($P < 0,05$) para os demais genótipos estudados. Este resultado para BRS 501 está de acordo com Martino et al. (2012), que avaliou a composição centesimal, a distribuição granulométrica e a concentração de minerais e de vitamina E de oito genótipos de sorgo destinados à alimentação humana, e encontrou um teor de lipídio de 3,1 $g.100g^{-1}$ para BRS 501.

Os taninos condensados foram somente encontrados nos genótipos de coloração marrom, em quantidades significativamente diferentes ($P < 0,05$), 4,48 $mg.g^{-1}$ para BR 305 e 1,72 $mg.g^{-1}$ para SC 319. O teor de fibras variou de 6,75 a 12,56 $g.100g^{-1}$, sendo os genótipos de pericarpo marrom, BR 305 e SC 319, os maiores níveis de fibras encontrados, 12,56 e 11,38 $g.100g^{-1}$, respectivamente. Vargas-Solórzano et al. (2014) comparou a desempenho de extrusão e as propriedades físico-químicas de genótipos de sorgo com pericarpos distintos, e resultados similares foram encontrados para o alto teor de fibra em genótipos marrons (10,57–12,86 $g.100g^{-1}$) ($P < 0,05$).

Tabela 3. Composição química aproximada dos seis genótipos de sorgo integral

Componente	BR 305	BRS 501	BRS 330	BRS 373	SC 319	CMSS 005
Umidade	10,86 ± 0,08[b]	9,68 ± 0,04[a]	11,27 ± 0,01[d]	11,15 ± 0,04[de]	11,09 ± 0,02[e]	10,42 ± 0,05[c]
Cinzas	1,28 ± 0,01[a]	1,94 ± 0,01[b]	1,45 ± 0,05[cd]	1,39 ± 0,04[ad]	1,57 ± 0,07[ce]	1,62 ± 0,02[e]
Proteína	10,29 ± 0,08[a]	10,32 ± 0,04[a]	9,37 ± 0,08[d]	9,83 ± 0,08[c]	9,98 ± 0,04[bc]	10,21 ± 0,04[ab]
Extrato etéreo	2,78 ± 0,09[a]	3,67 ± 0,02[b]	2,70 ± 0,12[a]	2,76 ± 0,06[a]	2,19 ± 0,03[c]	2,82 ± 0,03[a]
Carboidratos[α,*]	62,21	67,12	68,47	64,16	63,84	66,13
Fibra Alimentar[α]	12,56	7,31	6,75	10,71	11,38	8,85
Taninos condensados[β]	4,48 ± 0,26[a]	ND	ND	ND	1,72 ± 0,04[b]	ND
Valor calórico[α,**]	301,21	324,32	322,16	307	303,88	316,52

Média ± desvio padrão de medições em duplicata, expresso em g.100 g^{-1}. As médias com letras diferentes, dentro da mesma fila possuem diferença significativa ($P < 0,05$), [α] análises que foram realizadas sem repetições, [β] expresso em mg.g^{-1}, * análise determinada por diferença, ** (kcal/100g), ND: não detectado.

É importante destacar que os genótipos SC 319 e BRS 373 apresentaram glumas aderidas em alguns grãos, mesmo após a limpeza dos mesmos, o que pode ter influenciado o teor de fibra alimentar desses genótipos (Figura 8). A gluma é um tecido vegetal que promove proteção contra fungos, bactérias e outros agentes externos durante o desenvolvimento do grão (RING, WANISKA & ROONEY, 1988; AUDILAKSHMI et al. 1999). Alguns genótipos de sorgo possuem as glumas firmemente aderidas aos grãos, o que reduz o valor de mercado e a capacidade de processamento (ADEYANJU, PERUMAL & TESSO, 2015).

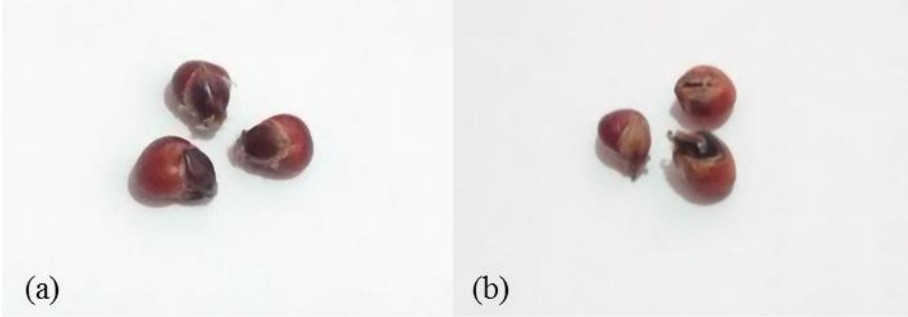


Figura 8 Grãos de sorgo com gluma aderente, (a) SC 319 e (b) BRS 373

Os valores energéticos variaram de 301,21 a 324,32 kcal em 100 g de sorgo, e o carboidrato é o seu principal macronutriente. O carboidrato deste cereal está presente, principalmente, na forma de amido, que corresponde ao polissacarídeo de reserva das plantas (QUEIROZ et al. 2012). Nos genótipos de sorgo estudados o carboidrato variou de 62,21 a 68,47 $g.100g^{-1}$. Na Figura 9 observam-se os grãos de sorgo cortados longitudinalmente. Os genótipos BR 305, SC 319 e CMSS 005 apresentaram maior área de endosperma farináceo, enquanto os genótipos BRS 330, BRS 373 e BRS 501 apresentaram maior área de endosperma córneo. Quanto maior o endosperma córneo (ou vítreo) mais denso é o grão e mais dura é a sua textura, com maior resistência à fragmentação. O endosperma farináceo apresenta boas propriedades de absorção de água e baixa resistência à ruptura.

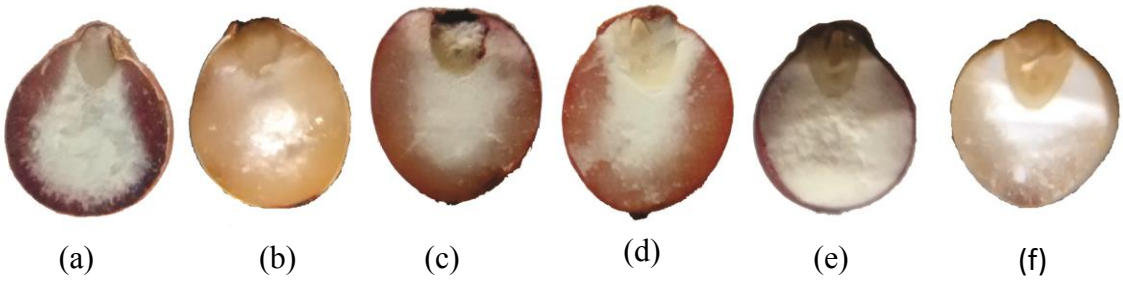


Figura 9 Corte longitudinal de grãos de sorgo, genótipos: (a) BR 305; (b) BRS 501; (c) BRS 330; (d) BRS 373; (e) SC319; (f) CMSS 005

4.1.2 Composição em minerais

A Tabela 4 descreve os resultados de composição em minerais dos diferentes genótipos de sorgo avaliados. Os minerais são metais ou compostos inorgânicos na forma iônica ou livre presentes em todos os tecidos e fluidos do corpo humano e sua presença é necessária para a manutenção de certos processos físico-químicos que são essenciais na manutenção da saúde humana (SOETAN, OLAIYA & OYEWOLE, 2010; GUPTA & GUPTA, 2014). Eles são mais importantes que as vitaminas, pois o corpo pode fazer uso de minerais na carência delas. Os nutrientes minerais podem ser classificados de acordo com a exigência por parte dos seres humanos e os principais minerais são: fósforo (P) e potássio (K), os secundários são cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) e os micro ou minerais traço são boro (B), cloro (Cl), cromo (Cr), fluor (Fl), iodo (I), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdénio (Mo), níquel (Ni), selénio (Se), sódio (Na), vanádio (V) e zinco (Zn) (GUPTA & GUPTA, 2014).

Os vegetais contêm quase todos os nutrientes minerais essenciais para a nutrição humana (SOETAN, OLAIYA & OYEWOLE, 2010; GUPTA & GUPTA, 2014). Segundo Queiroz et al. (2012), o sorgo é uma boa fonte de minerais (principalmente fósforo, potássio e zinco), porém os seus conteúdos são variáveis e pouco conhecidos, pois dependem do ambiente de cultivo. Martino et al., (2012), avaliou a composição em minerais de treze genótipos de sorgo e considerou-os como fonte de ferro, fósforo, magnésio e zinco.

Verificou-se as quantidades de Na, K, Mg, Ca, Mn, Fe, Zn, Cu, P e Cr, sendo o esse último não detectável em nenhum genótipo de sorgo analisado. Os resultados encontrados são próximos aos reportados por Vargas-Solórzano et al. (2014) e Chávez et al. (2017).

Tabela 4. Composição mineral dos seis genótipos de sorgo integral

Mineral	BR 305	BRS 501	BRS 330	BRS 373	SC 319	CMSS 005
Na	2,35 ± 0,08[a]	2,94 ± 0,19[b]	2,11 ± 0,00[a]	2,18 ± 0,18[a]	2,17 ± 0,01[a]	2,26 ± 0,08[a]
K	348,33 ± 1,94[a]	302,02 ± 3,17[b]	319,52 ± 3,33[c]	330,74 ± 0,61[c]	390,69 ± 2,25[d]	390,98 ± 7,99[d]
Mg	138,34 ± 2,74[ac]	190,86 ± 1,47[b]	139,92 ± 1,13[a]	117,17 ± 0,40[d]	131,03 ± 1,97[c]	141,80 ± 2,89[a]
Ca	9,94 ± 0,13[a]	11,57 ± 0,03[b]	18,30 ± 0,11[c]	14,14 ± 0,05[d]	20,19 ± 0,14[e]	15,34 ± 0,03[f]
Mn	1,29 ± 0,02[a]	1,88 ± 0,03[b]	1,83 ± 0,02[b]	1,53 ± 0,00[c]	2,38 ± 0,04[d]	1,72 ± 0,01[e]
Fe	3,07 ± 0,02[ac]	8,13 ± 0,64[b]	2,56 ± 0,01[c]	2,55 ± 0, 06[c]	3,83 ± 0,05[a]	2,82 ± 0,00[ac]
Zn	2,01 ± 0,02[a]	2,57 ± 0,01[b]	2,07 ± 0,02[a]	1,72 ± 0,01[c]	2,01 ± 0,04[a]	2,22 ± 0,03[d]
Cu	0,31 ± 0,00[a]	0,34 ± 0,00[b]	0,24 ± 0,00[c]	0,24 ± 0,00[c]	0,30 ± 0,01[d]	0,39 ± 0,01[e]
P	278,35 ± 4,31[ad]	375,17 ± 0,32[b]	307,07 ± 0,04[c]	277,08 ± 1,78[d]	287,05 ± 1,93[a]	347,05 ± 2,94[e]
Cr	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Média ± desvio padrão de medições em duplicata, expresso em $mg.100g^{-1}$. As médias com letras diferentes, dentro da mesma fila possuem diferença significativa ($P < 0,05$); ND: não detectado.

O Na foi encontrado nos seis genótipos de sorgo estudados, variou de 2,11 a 2,94 mg.100g^{-1} e não houve diferença significativa entre os genótipos, com exceção do BRS 501, que contém o maior teor de Na entre eles ($P < 0,05$). O teor de K variou de 302,02 a 390,98 mg.100g^{-1}, sendo SC 319 e CMSS 005 os genótipos com os maiores níveis, 390,69 e 390,98 mg.100g^{-1}, respectivamente, e sem diferença significativa entre eles ($P < 0,05$). O potássio é um dos principais minerais do sangue, sua forma catiônica é importante para a função celular do corpo humano, regulação de pressão, condução de impulso nervoso e contração muscular (principalmente do músculo cardíaco) (SOETAN, OLAIYA & OYEWOLE, 2010; GUPTA & GUPTA, 2014).

O Mg é quarto mineral mais abundante no corpo e é um componente ativo de vários sistemas enzimáticos e constitui ossos e dentes (SOETAN, OLAIYA & OYEWOLE, 2010; GUPTA & GUPTA, 2014). O Mg foi encontrado nos seis genótipos de sorgo em concentrações de 117,17 a 190,86 mg.100g^{-1}. O BRS 501 foi o genótipo com maior teor de Mg e com diferença significativa ($P < 0,05$) para os demais sorgos. O Ca variou amplamente de 9,94 a 20,19 mg.100g^{-1} e os seis genótipos apresentaram diferença significativa entre eles ($P < 0,05$). O Ca desempenha um papel importante no desenvolvimento de ossos e dentes, auxilia a prevenção e trata doenças ósseas e regula a coagulação (GUPTA & GUPTA, 2014).

O Mn é um mineral traço essencial encontrado em todos os tecidos e faz-se necessário no metabolismo de aminoácidos, lipídios, proteínas e carboidratos. Ele desempenha um papel importante no desenvolvimento de osso e cartilagens e na cicatrização de feridas (GUPTA & GUPTA, 2014). Nos seis genótipos de sorgo, o manganês variou de 1,29 a 2,38 mg.100g^{-1}.

O Fe funciona como hemoglobina no transporte de oxigênio na respiração celular. Ele funciona como componente essencial de enzimas envolvidas em oxidação biológica (SOETAN, OLAIYA & OYEWOLE, 2010). A deficiência de ferro é o distúrbio nutricional mais comum em todo o mundo e está relacionada com uma baixa ingestão dietética, absorção intestinal inadequada, perda excessiva de sangue e/ou necessidades aumentadas (GUPTA & GUPTA, 2014). Nos genótipos de sorgo estudados, o ferro apresentou variação de 2,55 a 8,13 mg.100g^{-1} e o BRS 501 apresentou o maior teor, com diferença significativa para os demais genótipos ($P < 0,05$).

O Zn, um mineral traço essencial para a atividade metabólica de muitas enzimas do corpo, é considerado essencial para divisão celular e na síntese de DNA e proteína. Os fitatos em alimentos determinam a quantidade total de Zn absorvido e as principais fontes de fitatos incluem produtos de cereais, como cereais matinais, pães, batatas e petiscos salgados, bebidas quentes, frutas e nozes (SOETAN, OLAIYA & OYEWOLE, 2010; GUPTA & GUPTA, 2014). O zinco variou de 1,72 a 2,57 mg.100g^{-1} nos genótipos de sorgo.

O cobre é um mineral essencial para a saúde humana, entretanto, pode ser tóxico, dependendo da quantidade ingerida (SOETAN, OLAIYA & OYEWOLE, 2010). Ele está associado à saúde óssea, função imune e frequência de infecções, risco cardiovascular e alterações no metabolismo do colesterol (SOETAN, OLAIYA & OYEWOLE, 2010; GUPTA & GUPTA, 2014). O Cu variou de 0,24 a 0,39 mg.100g^{-1} nos sorgos, e o genótipo CMSS 005 contém o maior teor e possui diferença significativa ($P < 0,05$) para os demais.

O P está presente em todas as células do corpo, principalmente nos ossos e dentes, ele desempenha um papel importante na utilização de carboidratos e gorduras pelo corpo e na síntese de proteína para o crescimento, manutenção e reparo das células e tecidos (GUPTA & GUPTA, 2014), nos sorgos o P variou de 277,08 a 375,17 mg.100g^{-1}, sendo o BRS 501 o genótipo com o maior teor ($P < 0,05$).

4.2 Distribuição granulométrica das farinhas de sorgo

A distribuição do tamanho de partículas das farinhas dos seis genótipos de sorgo está apresentada na Figura 10 e no Apêndice A. A distribuição do tamanho das partículas está

correlacionada com processo de moagem utilizado (CARVALHO & ASCHERI, 1999) e afeta o comportamento da extrusão, e, consequentemente, as características dos extrudados, como a expansão e propriedades mecânicas (CARVALHO & ASCHERI, 1999; SHEVKANI et al. 2014). O tamanho das partículas, também, pode afetar diretamente os macronutrientes, como a digestão dos carboidratos. Quanto menor o tamanho da partícula, maior é a taxa de digestão de nutrientes devido ao aumento da superfície relativa para a reação das enzimas (MORAES et al. 2015).

As farinhas dos seis genótipos de sorgo apresentaram distribuição granulométrica normal e é possível perceber diferenças significativas nas quantidades de farinhas retidas em cada peneira (P < 0,05).

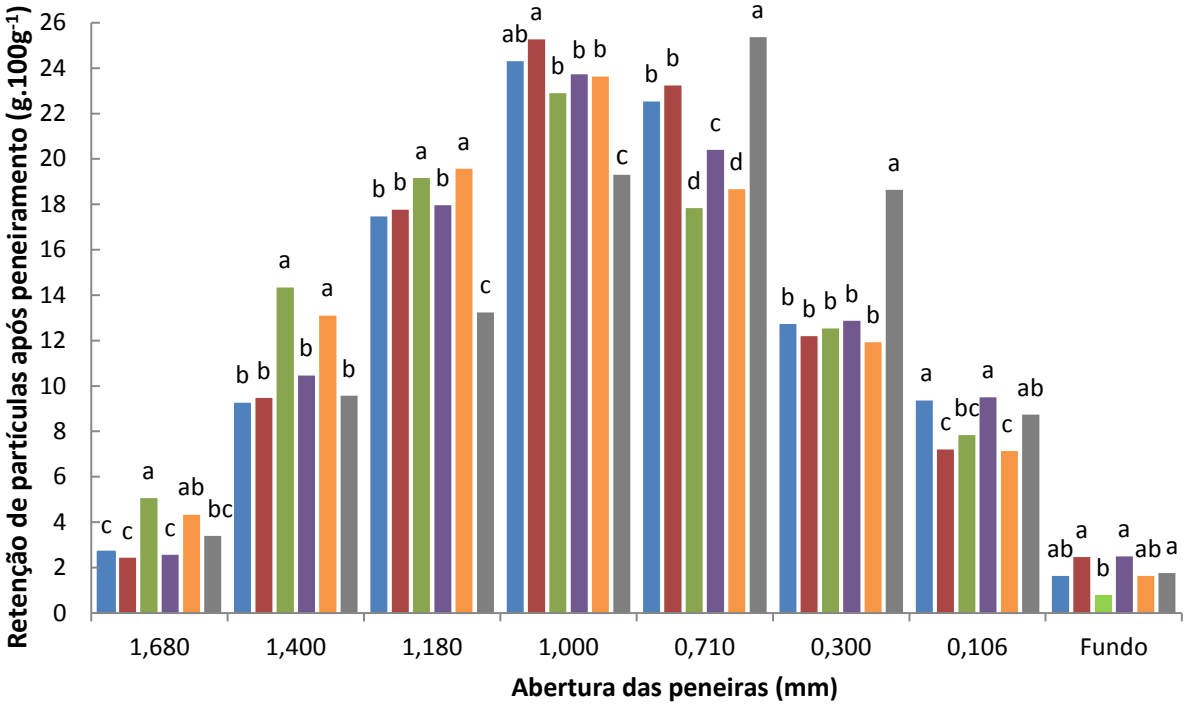


Figura 10. Distribuição do tamanho de partículas de farinhas de sorgo integral: (■) BR 305; (■) SC 319; (■) BRS 501; (■) BRS 330; (■) BRS 373; (■) CMSS 005. Colunas construídas com dados do Anexo A; Colunas com letras diferentes em uma abertura de malha igual apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey (P < 0,05).

Uma vez que as condições de moagem e umidade dos grãos de sorgo são constantes, as diferenças na distribuição do tamanho de partícula podem ser atribuídas à composição química do grão (VARGAS-SOLÓRZANO et al. 2014; CHÁVEZ et al. 2017) e à capacidade de separar as partes botânicas mais superficiais dos grãos integrais (camada de aleurona e endosperma periférico) (VARGAS-SOLÓRZANO et al. 2014). Ocorreu maior retenção de farinhas em peneiras de abertura de 1,180 mm, 1,00 mm e 0,710 mm, com exceção do genótipo CMSS 005, que reteve mais farinha em peneiras de 1,00 mm 0,710 mm e 0,300 mm, com diferença significativa (P < 0,05), portanto apresentou farinha com frações mais finas.

Os genótipos de coloração marrom, BR 305 e SC 319 apresentaram distribuição granulométrica significativamente similar (P < 0,05), tal fato pode ser explicado pela presença

de taninos condensados na camada de testa destes genótipos castanhos, que, segundo Vargas-Solórzano et al. (2014), ajuda a enfraquecer a camada de aleurona, o que torna a fragmentação dos grãos mais fácil. No entanto, BR 305 e SC 319 possuem os altos teores de fibra alimentar (Tabela 3) e esse fato pode dificultar a fragmentação dos grãos. Neste estudo, a predominância dos tamanhos de partícula dos sorgos de coloração marrom foi de ≤ 1,180 mm a ≥ 0,710 mm.

As farinhas do genótipos BRS 501 (branco) e BRS 373 (vermelho) são as com o maior teor de tamanho de partículas grandes (≥1,180 mm). A dificuldade em fragmentar estes genótipos pode estar relacionada com o teor de cinzas de BRS 501, significativamente maior que nos demais genótipos (P < 0,05) (Tabela 3) e, pela existência de um endosperma córneo maior que o endosperma farináceo tanto em BRS 501, quanto em BRS 373.

4.3 Variáveis do processo de extrusão

4.3.1 Torque e energia mecânica específica (EME)

Os resultados da análise de variância das variáveis dependentes do processamento de extrusão (torque e EME) estão dispostos em Tabela 5. O torque e a energia mecânica específica são parâmetros do sistema de extrusão, indicadores do trabalho realizado sobre o material que é processado em extrusão e são controlados pela reologia da massa fundida e pelas condições de cisalhamento criadas pela extrusora (AL-RABADI et al. 2011).

Pode-se observar que, para a variável resposta torque, o fator genótipo influenciou os resultados (P < 0,05), e o fator % açúcar não influenciou (P ≥ 0,05). No entanto, a interação dos dois fatores foi significativa para os resultados de torque durante o processamento de todos os tratamentos (P < 0,05), ou seja, tanto o genótipo utilizado e a adição de açúcar afetaram o torque, nas condições operacionais de extrusão utilizadas. Para a variável dependente energia mecânica específica, o fator genótipo influenciou os resultados (P < 0,05), e o fator % açúcar não foi significativo (P ≥ 0,05), bem como a interação dos dois fatores não apresentou significância (P ≥ 0,05).

Tabela 5 Análises de variância para as variáveis dependentes: torque e energia mecânica específica do processo de extrusão de diferentes genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Resposta	Fonte	SQ	GL	QM	F	Valor P
Torque	Genótipo	0,0001	5	0,00003	4,89	0,011
	% Açúcar	0,0000	1	0,00000	0,03	0,872
	Genótipo*% Açúcar	0,0001	5	0,00002	4,28	0,018
	Resíduos	0,0001	12	0,00001		
	Total	0,0003	23			
EME	Genótipo	92759,64	5	18551,93	4,44	0,016
	% Açúcar	5547,31	1	5547,31	1,33	0,272
	Genótipo*% Açúcar	57395,62	5	11479,12	2,75	0,070
	Resíduos	50150,93	12	4179,24		
	Total	205853,50	23			

EME: energia mecânica específica; SM: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; Valor P: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5,0%; Para Torque e EME: n=2.

Os valores de torque e EME para a extrusão estão relacionados com os tamanhos de partículas das farinhas (CARVALHO et al. 2010; AL-RABADI et al. 2011). Granulometrias menores podem causar maior viscosidade durante a extrusão, pois há maior absorção de água e, consequentemente, maior inchamento do amido. A menor viscosidade de fusão durante a extrusão das partículas com granulometrias médias e grandes pode estar relacionada à penetração incompleta de água nas partículas maiores que limitam o inchamento do amido, bem como a presença de camadas externas dos grãos (isto é, revestimento de grão) e um endosperma mais impenetrável devido às paredes celulares e matrizes de proteínas intactas (AL-RABADI et al. 2011).

O torque nos tratamentos de extrusão dos seis genótipos de sorgo, com 0% e 10% de açúcar está representado na Figura 11 e Anexo B. Neste estudo, as condições operacionais da extrusora foram mantidas constantes, sendo EME e torque influenciados pela reologia da massa, esta depende das características físico-químicas dos grãos de sorgo. O torque variou de 8,95 a 21,91 Nm, sendo T2 composto pelo genótipo BRS 501 e 0% de açúcar, o tratamento com menor torque e, significativamente, diferente dos demais tratamentos, com exceção de T12 (genótipo CMSS 005, com 10% de açúcar) ($P < 0,05$). Tal fato pode ser explicado por, apesar de os seis genótipos apresentarem distribuição granulométrica similar, o genótipo BRS 501 apresentou maior quantidade de frações grosseiras (> 1,4 mm) quando comparado a outros genótipos. Além desse fator, o torque e, consequentemente, a EME são diminuídos no processamento de BRS 501 com 0% de açúcar, devido maior teor de lipídio presente no genótipo (Tabela 3). Este componente pode atuar como lubrificante na massa fundida, pois diminui o atrito entre a matéria, o parafuso e o tambor de extrusão, e consequentemente, reduz a viscosidade e o esforço de cisalhamento no cilindro de extrusão, diminuindo o torque e a EME (SINGH, GAMLATH & WAKELING, 2007; DE PILLI et al. 2015).

Os demais tratamentos não apresentaram diferença significativa entre si, mesmo com a adição de 10% de açúcar. Tal resultado diverge dos resultados encontrados por Pitts et al. (2014), que investigou o efeito de diferentes teores de sal e de açúcar na extrusão e nas propriedades físicas de uma mistura de trigo e milho. Os maiores níveis de sal e açúcar na formulação de expandidos de milho e trigo diminuíram significativamente o torque e a energia mecânica específica.

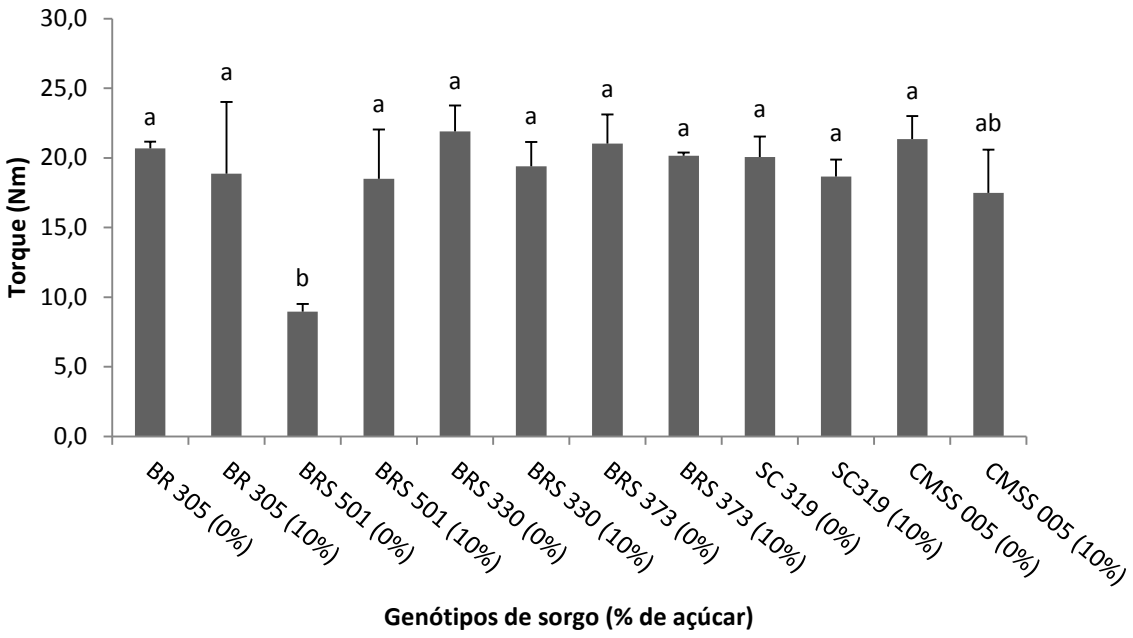


Figura 11 Efeito do genótipo de sorgo e da adição de açúcar sobre o torque realizado durante a extrusão: BR 305 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; BRS 501 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; BRS 330 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; BRS 373 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; SC 319 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; CMSS 005 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; Colunas construídas a partir dos dados do Anexo B; Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

A energia mecânica específica (EME) é a quantidade de trabalho realizado que é transferido para converter a matéria-prima em produtos expandidos (FANG, ZHANG & WEI, 2014; JAFARI, KOOCHEKI & MILANI, 2017), e está relacionada com a viscosidade da massa fundida (JAFARI, KOOCHEKI & MILANI, 2017). Os valores de enérgica mecânica específica podem indicar a extensão da degradação molecular que o material sofre durante o processo de extrusão (CHEN et al. 2010). Uma EME mais elevada conduz, normalmente, a uma maior temperatura de fusão no barril, o que induz uma força motriz maior para a expansão dos extrudados (FANG, ZHANG & WEI, 2014).

De acordo com a Figura 12 compreende-se que os genótipos de sorgo apresentaram efeito significativo em EME, que variou de 159,46 $kJ.kg^{-1}$ a 472,41 $kJ.kg^{-1}$ (Apêndice B). Os genótipos BR 305, BRS 330, BRS 373, CMSS 005 e SC 319 não apresentaram diferença significativa ($P \geq 0,05$), indicando que, para as condições de processamento utilizadas, a energia mecânica específica apresentou comportamento regular para estes genótipos. Entretanto, para BRS 501, a EME decaiu significativamente ($P < 0,05$), pois, como foi avaliado em torque, o tratamento de BRS 501 com 0% de açúcar, o efeito plastificante do lipídio, presente em maior concentração neste genótipo, impactou no comportamento de EME.

Uma vez que há um material plastificante, como o lipídio, a redução da viscosidade da massa na extrusora diminui o tempo médio que a mesma permanece na extrusora e, finalmente, reduz a relação de conversão de energia mecânica da extrusora em energia térmica, consequentemente a EME se torna mais baixa. Apesar de o açúcar ter efeito plastificante sobre o material na extrusão, o mesmo não causou efeito significativo sobre EME (Tabela 5), ressaltando que o efeito do açúcar na extrusão depende de diversos fatores

como concentração e o tipo de açúcar adicionado, teor de umidade da farinha para extrusão e do cereal utilizado.

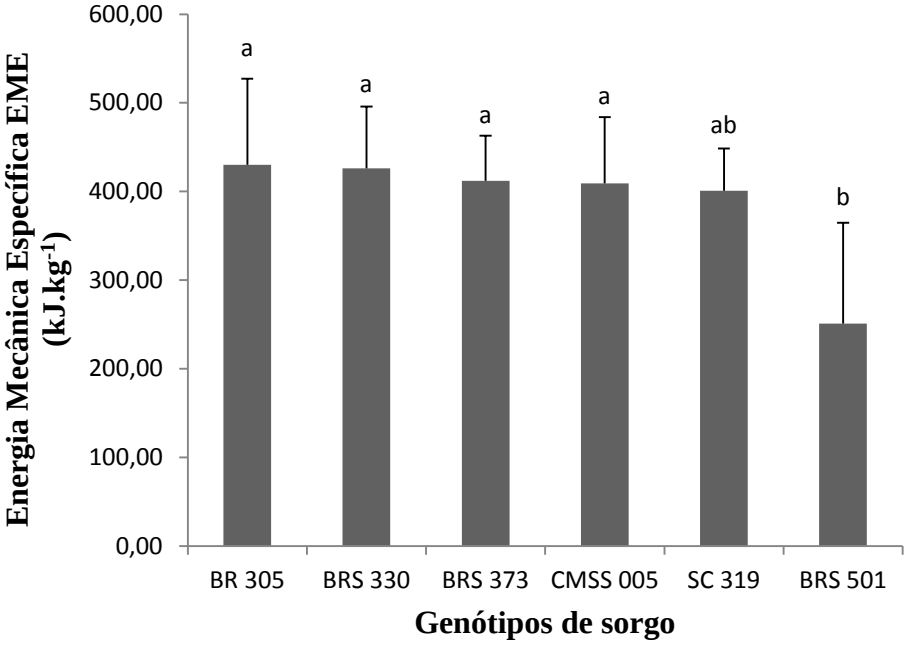


Figura 12 Efeitos dos genótipos de sorgo sobre a energia mecânica específica (EME) durante a extrusão. Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey (P < 0,05).

4.4 Propriedades físicas dos extrudados

4.4.1 Índice de expansão radial (IER) e densidade aparente

Os resultados de índice de expansão radial e densidade aparente estão dispostos na Figura 13 e na Figura 14, respectivamente. Os genótipos e a % de açúcar apresentaram interação para ambas as variáveis: IER e densidade aparente (P < 0,05) (Apêndice C).

A extensão da expansão do produto extrudado é uma das propriedades mais importantes, pois influencia a estrutura porosa do expandido (AL-RABADI et al. 2011). O índice de expansão radial variou de 1,18 a 9,07 (Apêndice D). De acordo com a Figura 13, nota-se que todos os genótipos apresentaram valores significativamente diferentes quando compara-se o mesmo genótipo com 0% e 10% de açúcar (P < 0,05), com exceção de SC 319 (0%) e SC 319 (10%), que apresentaram valores significativamente similares. O comportamento de SC 319 pode ser explicado pelo seu teor de fibra alimentar (Tabela 3), que dificulta a expansão (PITTS et al. 2014; SHEVKANI et al. 2014; VARGAS-SOLÓRZANO et al. 2014; MKANDAWIRE et al. 2015).

Os genótipos com 0% de açúcar, excluindo-se o T2 (BRS 501 com 0% de açúcar) apresentaram maior expansão do que os genótipos com 10% de açúcar. Tal comportamento está de acordo com o esperando, pois o aumento do teor de açúcar na matéria-prima para extrusão resulta em extrudados menos expandidos com tamanhos menores de células de ar e paredes celulares mais espessas (JIN, HSIEH & HUFF, 1995; FAN, MITCHELL & BLANSHARD, 1996b; CARVALHO & MITCHELL, 2000; PITTS et al. 2014).

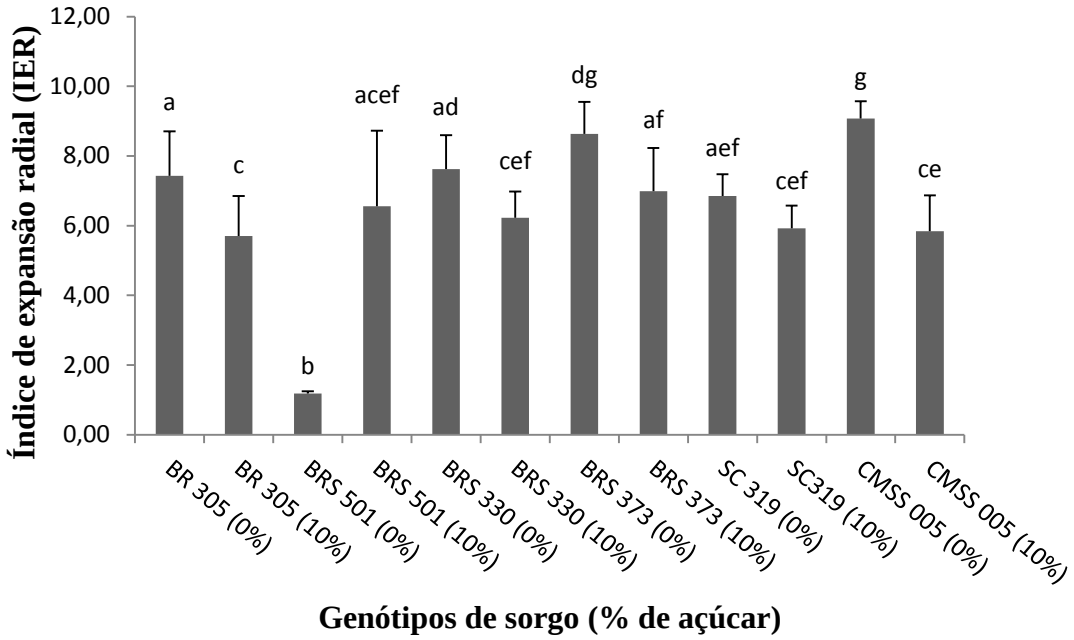


Figura 13 Efeito do genótipo de sorgo e da adição de açúcar sobre o índice de expansão radial em extrudados de sorgo integral: BR 305 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; BRS 501 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; BRS 330 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; BRS 373 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; SC 319 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; CMSS 005 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; Colunas construídas a partir dos dados do Anexo B; Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey (P<0,05).

O genótipo branco CMSS 005 com 0% de açúcar (genótipo com maior fração de granulometria fina) e o genótipo vermelho BRS 373 com 0% de açúcar apresentaram o maior índice de expansão. Ainda não está claro como o tamanho de partícula interfere na expansão dos extrudados. Segundo Al-Rabadi et al. (2011) o tamanho de partícula de sorgo não tem efeito sobre o índice de expansão, no entanto Carvalho et al. (2010) e Chávez et al. (2017) atribuem o aumento de expansão aos tamanhos de partículas maiores, pois necessitam de um maior cisalhamento para comprimir as partículas e fazê-las passar através da matriz da extrusora, induzindo maior degradação de moléculas de amido e maior formação bolhas de ar extensíveis durante a saída da extrusão. Entretanto, Shevkani et al. (2014) obteve maior expansão nos extrudados produzidos a partir de farinhas mais finas. Ele atribuiu esse fato a maior conversão de amido durante a extrusão.

A densidade aparente é um indicador de mudanças estruturais em um material durante o processo de extrusão (JAFARI, KOOCHEKI & MILANI, 2017) e tem uma relação inversa com a expansão radial após o resfriamento, portanto, a maior expansão leva a baixa densidade aparente. Esta relação, também, é conduzida pela combinação da conversão de amido com a composição da massa durante a fusão (VARGAS-SOLÓRZANO et al. 2014). A densidade aparente variou de 0,12 a 1,32 $g.cm^{-3}$ (Apêndice D) e a adição de açúcar em todos os genótipos causou um aumento significativo (P < 0,05) da densidade aparente, como exceção de BRS 501 (Figura 14). Esse fenômeno pode ser explicado pela diluição de moléculas de amido e também pelo efeito plastificante do açúcar, que reduz a conversão do amido e resulta numa parede de bolha menos extensível (FAN, MITCHELL, & BLANSHARD. 1996a; CARVALHO & MITCHELL, 2000). Os resultados tanto de densidade aparente quanto de

expansão radial estão de acordo com os resultados encontrados por Pitts et al. (2014) e Mkandawire et al. (2015), onde a adição de açúcar diminuiu a expansão radial e aumentou a densidade aparente de extrudados de milho e trigo e de extrudados de sorgo, respectivamente.

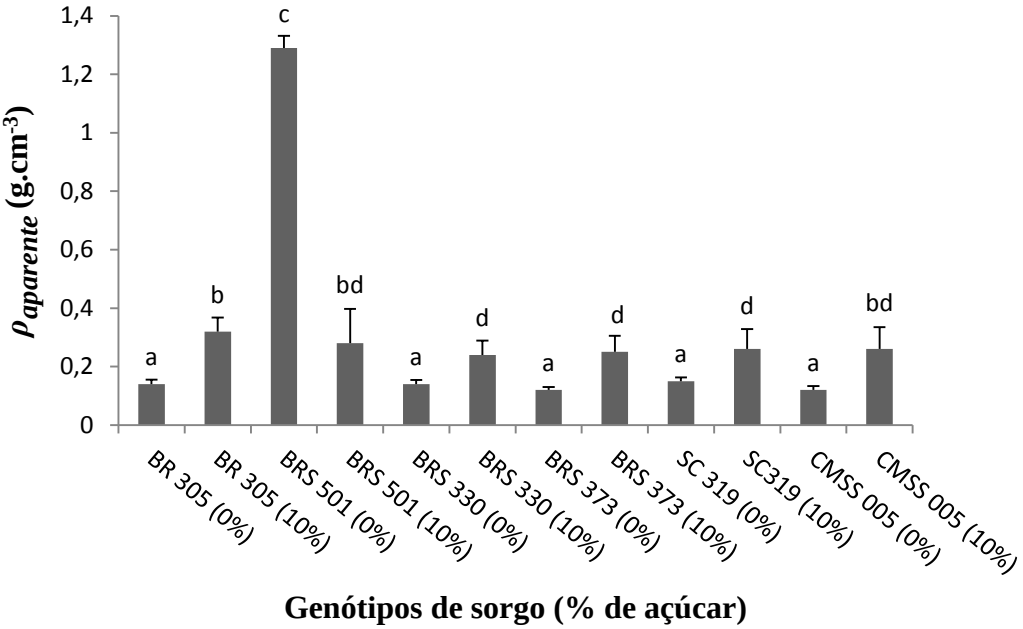


Figura 14 Efeito do genótipo de sorgo e da adição de açúcar sobre a densidade aparente de extrudados de sorgo integral: BR 305 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; BRS 501 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; BRS 330 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; BRS 373 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; SC 319 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; CMSS 005 (0%) e (10%), sem e com açúcar, respectivamente; Colunas construídas a partir dos dados do Anexo B; Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

No caso do BRS 501 com 0% de açúcar, a densidade aparente foi maior e a expansão radial foi menor do que os demais tratamentos ($P < 0,05$), e pode ser explicado pelo maior teor de lipídio (Tabela 3) presente neste genótipo. Pode-se inferir que a presença do lipídio causou maior efeito plastificante do que a presença de açúcar na concentração estudada. Shevkani et al. (2014) reportou a diminuição da expansão em produtos expandidos de diferentes frações granulométricas no processamento de milho integral e atribuiu esse comportamento à presença de lipídio em determinadas frações, o que contribuiu para lubrificar ou reduzir a fricção no interior da extrusora, assim reduzindo o rompimento da estrutura granular do amido levando a menor expansão radial do extrudado.

Na Figura 15 observa-se as macroestruturas dos extrudados. Apesar de IER ser menor para os tratamentos com 10% de açúcar, é possível notar formação de poros nesses extrudados, de tamanhos similares aos extrudados com 0% de açúcar. Em BRS 501 com 0% de açúcar nota-se a alta densidade aparente e a não formação de bolhas, indicando baixo IER. A expansão é causada principalmente pela vaporização súbita da água à medida que o material sai da matriz (PITTS et al. 2014). A expansão reduzida e o aumento da densidade com o teor de açúcar é uma combinação de uma redução no crescimento de bolhas e um aumento no grau de encolhimento na saída da matriz (FAN, MITCHELL & BLANSHARD, 1996a; PITTS et al. 2014). Na imagem longitudinal de SC 319 percebe-se que ocorreram

ondulações no extrudado, tal efeito indica instabilidade de processamento, que pode ser causada pelo alto teor de fibras.

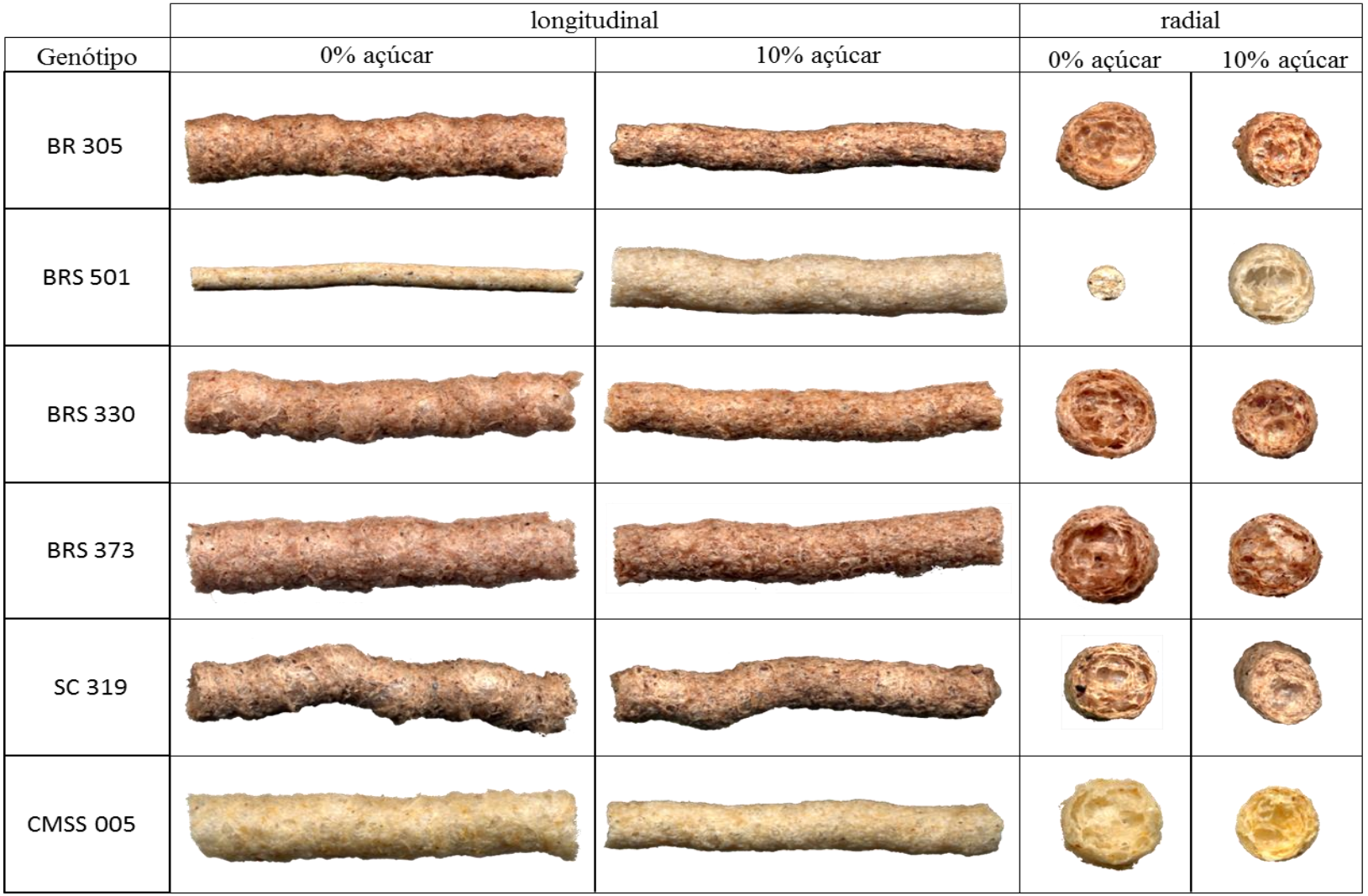


Figura 15 Scan dos extrudados de diferentes genótipos de sorgo em 0% e 10% de açúcar (2x)

4.4.2 Índice de solubilidade em água (ISA) e índice de absorção em água (IAA)

As propriedades de hidratação indicam a habilidade dos extrudados em absorver e se solubilizarem em água e são medidas pelo ISA e IAA (SHUKLA, MUTHUKUMARAPPAN & JULSON, 2005). ISA representa o grau de conversão de amido e a quantidade de polissacarídeos liberados dos grânulos de amido durante o processo de extrusão, e o IAA está relacionado à disponibilidade de grupos hidrofílicos se ligarem à água e a capacidade de formação de gel das moléculas de amido após a extrusão. No amido esta propriedade é resultado da estrutura molecular da amilopectina (AL-RABADI et al. 2011; CHÁVEZ et al. 2017). Tanto ISA quanto IAA, também, estão relacionados com as condições de extrusão (efeito de aquecimento em relação à temperatura média da massa, efeito mecânico avaliado pela taxa de cisalhamento e tempo de permanência na extrusora) (MEZREB et al. 2006).

O genótipo de sorgo, a % de açúcar e a interação desses dois fatores influenciaram os resultados de ISA e IAA para todos os tratamentos ($P < 0,05$) (Apêndice E). De acordo com a Tabela 6, o índice de solubilidade em água (ISA) variou de 4,68 a 22,33 %, enquanto o índice de absorção de água (IAA) variou de 4,18 a 5,13 g gel.g^{-1}, e a adição de 10% de açúcar reduziu o ISA de todos os genótipos, com exceção de BRS 501. É interessante notar que os valores de IAA não variaram consideravelmente em relação aos genótipos e a adição de açúcar. Comportamento similar foi observado por Mezreb et al. (2006) quanto a determinação de IAA de produtos extrudados de farinha de trigo processada por extrusão com níveis crescentes de sacarose (0,0 a 12,5%), em que valores de IAA não variaram com a adição de açúcar.

Segundo Shukla, Muthukumarappan e Julson (2005), a boa expansão do extrudado resultaria em maior absorção de água, devido à presença de uma superfície mais fina nos extrudados, assim como maior superfície específica, resultando em maior solubilidade do extrudado. Tal fato pode ser comprovado pelos valores de ISA, que foram maiores para o tratamentos com 0% de açúcar de maior expansão radial. Em geral, estes expandiram mais que os tratamentos com 10% de açúcar.

Tabela 6 Índice de solubilidade em água (ISA) e índice de absorção de água (IAA) em função do genótipo de sorgo e % de açúcar adicionado no processamento por extrusão

Tratamento	Genótipo	% Açúcar	ISA	IAA
T1	BR 305	0	20,53 ± 1,70^{ab}	4,75 ± 0,08^{ab}
T7	BR 305	10	15,86 ± 1,32^{de}	4,18 ± 0,07^{c}
T2	BRS 501	0	4,68 ± 0,64^{f}	4,44 ± 0,60^{bc}
T8	BRS 501	10	15,30 ± 2,77^{de}	4,75 ± 0,16^{ab}
T3	BRS 330	0	19,62 ± 1,13^{ab}	4,76 ± 0,11^{ab}
T9	BRS 330	10	15,67 ± 0,79^{de}	4,45 ± 0,04^{bc}
T4	BRS 373	0	14,76 ± 2,23^{de}	5,13 ± 0,13^{a}
T10	BRS 373	10	13,15 ± 1,21^{e}	4,83 ± 0,10^{b}
T5	SC 319	0	22,33 ± 1,04^{a}	5,11 ±0,31^{a}
T11	SC319	10	19,16 ± 0,44^{bc}	4,83 ± 0,05^{ab}
T6	CMSS 005	0	22,03 ± 1,01^{a}	5,09 ± 0,09^{a}
T12	CMSS 005	10	16,63 ± 0,86^{cd}	4,83 ± 0,06^{ab}

Os resultados expressam a média ± desvio padrão de ISA em % e IAA em g gel.g$^{-1.}$ Para todas as variáveis, n=6. Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

Nota-se que os tratamentos de CMSS 005, SC 319 e BR 305, com 0% de açúcar apresentaram os maiores valores para ISA e valores intermediários para IAA, sugerindo que houve alto cisalhamento dos grânulos de amido durante a extrusão levando à maior absorção água. Os genótipos BR 305 e SC 319 com 0% de açúcar absorveram e solubilizaram o mesmo teor de água, no entanto BRS 305 foi menos solúvel do que SC 319 após a adição de 10% de açúcar, que pode ter sido influenciado pelo teor de tanino ($P < 0,05$) presente no genótipo BR 305 (Tabela 3) e maior grau de ramificação das moléculas de amido (não determinado). Resultados similares de ISA e IAA foram encontrados por Vargas-Solórzano et al. (2014) para o extrudado de sorgo de pericarpo marrom.

O tratamento de BRS 501 com 0% de açúcar apresentou o menor valor de ISA. Pode-se entender que T2 sofreu uma baixa conversão de amido, o que confirmou os valores baixos de energia mecânica específica (EME). O tratamento T4 (genótipo BRS 373 e 0% de açúcar) obteve o menor índice de solubilidade, quando comparado aos demais tratamentos sem açúcar, com exceção de BRS 501. Ele apresentou o segundo maior índice de expansão radial (Figura 12), sendo indicador de alto grau de conversão de amido. Esse comportamento pode se explicado pelo alto teor de fibras (Tabela 3). A solubilidade depende não só do efeito do processamento de extrusão sobre o amido, mas também da interação com outros nutrientes como as proteínas, as fibras (solúvel e insolúvel) e os lipídios (formação de complexo amilose-lipídio), e suas modificações estruturais.

O tratamento T7 (genótipo BR 305 com 10% de açúcar) absorveu o menor teor de água, no entanto, ele foi estatisticamente igual a T2 (BRS 501 com 0% de açúcar) e T9 (BRS 330 com 10% de água) ($P < 0,05$). Tanto BRS 305 quanto BRS 373 apresentaram alto teor de fibras (Tabela 3) e valores intermediários de ISA (para os tratamentos com 10% de açúcar). Segundo Vargas-Solórzano et al. (2014), a presença de fibra promove redução do potencial de inchamento e absorção de água das moléculas de amido, pois sua composição (celulose, hemicelulose, ligninas e pectinas) confere insolubilidade ao sistema. No caso de BRS 501, os resultados de torque, EME (Figura 11 e Figura 12) e de ISA inferem menor dano mecânico à fração amilácea durante a extrusão. Mkandawire et al. (2015) correlacionaram o baixo valor de IAA em *snacks* a base de sorgo com a porosidade do extrudado. A redução da absorção de água reflete na dificuldade de acessibilidade líquida dos amidos extrudados em uma estrutura compacta.

.

4.4.3 Cor

A cor é um atributo de qualidade importante para os produtos extrudados, uma vez que muitas reações durante a extrusão podem afetar a cor, bem como o efeito da inclusão de novas matérias-primas, como o açúcar (NASCIMENTO et al. 2012; OLIVEIRA, SCHMIELE & STEEL, 2017).

A partir das análises de variância para as variáveis respostas dos parâmetros de cor: luminosidade (L*), cromaticidade (a*), cromaticidade (b*), Chroma (C*), ângulo *hue* (hº) e índice do branco (*WI*), nota-se que houve interação dos fatores genótipo e % de açúcar ($P < 0,05$) (Apêndice F e Apêndice G).

O valor do índice do branco (*WI*) variou de 48,79 a 70,79 e indica o quanto a amostra é próxima do branco. A adição de 10% de açúcar aumentou *WI* para os genótipos BR 305, BRS 330, BRS 373 e CMSS 005 (Tabela 8). Os genótipos brancos BRS 501 e CMSS 005 apresentaram maiores *WI* e L* e foram significativamente iguais ($P < 0,05$), no entanto somente, CMSS 005 apresentou valores mais elevados para b* (Tabela 7). A adição de 10% de açúcar aumentou significativamente a luminosidade L* e diminuiu o valor b* para CMSS 005. Para BRS 501, a adição de 10% de açúcar não alterou significativamente o valor de L*.

A adição de 10% de açúcar em BR 305 aumentou L* e diminuiu os valores de a* e b*. Para SC 319, a adição de 10% de açúcar não influenciou, significativamente, L*, a* e b*.

Nota-se os menores valores de L* para BR 305 e SC 319, que pode ser atribuído a coloração do pericarpo marrom em ambos e a presença da gluma escura em SC 319. Para os genótipos BRS 330 e BRS 373, L* aumentou após a adição de 10% de açúcar, porém b* não sofreu alteração e a* diminuiu em BRS 330.

Segundo a Tabela 8, os valores de C* variaram de 14,86 a 20,96, indicando pouca saturação de cor dos extrudados de sorgo com 0% e 10% de açúcar. O ângulo *hue* (hº) variou de 54,46 a 79,10. Ângulos próximos a 90º representam coloração mais próxima ao amarelo.

Tabela 7 Luminosidade (L*), cromaticidade (a*) e cromaticidade (b*) em função dos fatores: genótipo de sorgo e % de açúcar

Tratamento	Genótipo	% Açúcar	L*	a*	b*
T1	BR 305	0	52,89 ± 0,24^{h}	10,79 ± 0,15^{a}	16,93 ± 0,07^{c}
T7	BR 305	10	57,22 ± 0,90^{f}	9,51 ± 0,25^{d}	15,16 ± 0,39^{efg}
T2	BRS 501	0	76,02 ± 0,53^{a}	3,19 ± 0,09^{h}	14,51 ± 0,10^{g}
T8	BRS 501	10	75,59 ± 0,47^{ab}	4,09 ± 0,11^{f}	15,50 ± 0,38^{ef}
T3	BRS 330	0	60,74 ± 0,73^{d}	10,09 ± 0,11^{b}	15,92 ± 0,36^{de}
T9	BRS 330	10	61,97 ± 0,37^{c}	9,55 ± 0,08^{cd}	16,47 ± 0,40^{cd}
T4	BRS 373	0	59,40 ± 0,80^{e}	9,76 ± 0,06^{c}	13,66 ± 0,17^{h}
T10	BRS 373	10	60,33 ± 0,28^{d}	9,78 ± 0,11^{c}	14,71 ± 0,36^{fg}
T5	SC 319	0	54,38 ± 0,58^{g}	8,39 ± 0,26^{e}	14,65 ± 0,47^{g}
T11	SC319	10	53,87 ± 0,46^{g}	8,62 ± 0,15^{e}	14,96 ± 0,39^{fg}
T6	CMSS 005	0	74,84 ± 0,23^{a}	4,13 ± 0,06^{f}	20,55 ± 0,39^{a}
T12	CMSS 005	10	76,46 ± 0,26^{b}	3,72 ± 0,14^{g}	19,38 ± 1,28^{b}

Os resultados expressam a média ± desvio padrão; Para todas as variáveis, n=8. Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

Tabela 8 Chroma (C*), ângulo *hue* (hº) e índice do branco (*WI*) dos extrudados em função dos fatores: genótipo de sorgo e % de açúcar

Tratamento	Genótipo	% Açúcar	C*	h°	WI
T1	BR 305	0	20,08 ± 0,12^{b}	57,49 ± 0,33^{e}	48,79 ± 0,26^{i}
T7	BR 305	10	17,90 ± 0,47^{e}	57,90 ± 0,09^{e}	53,62 ± 1,01^{g}
T2	BRS 501	0	14,86 ± 0,10^{i}	77,60 ± 0,37^{b}	71,79 ± 0,28^{a}
T8	BRS 501	10	16,03 ± 0,34^{h}	75,20 ± 0,69^{c}	70,79 ± 0,21^{b}
T3	BRS 330	0	18,85 ± 0,26^{d}	57,62 ± 0,84^{e}	56,45 ± 0,56^{f}
T9	BRS 330	10	19,04 ± 0,32^{cd}	59,88 ± 0,74^{d}	57,47 ± 0,23^{e}
T4	BRS 373	0	16,79 ± 0,16^{gh}	54,46 ± 0,27^{g}	56,06 ± 0,69^{f}
T10	BRS 373	10	17,67 ± 0,35^{ef}	56,37 ± 0,37^{f}	56,57 ± 0,12^{ef}
T5	SC 319	0	16,88 ± 0,54^{fg}	60,20 ± 0,11^{d}	51,35 ± 0,72^{h}
T11	SC319	10	17,27 ± 0,42^{efg}	60,03 ± 0,22^{d}	50,74 ± 0,58^{h}
T6	CMSS 005	0	20,96 ± 0,39^{a}	78,63 ± 0,07^{a}	67,25 ± 0,42^{d}
T12	CMSS 005	10	19,74 ± 1,28^{bc}	79,10 ± 0,32^{a}	69,27 ± 1,01^{c}

Os resultados expressam a média ± desvio padrão; Para todas as variáveis, n=8. Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

4.4.4 Viscosidade de pasta

A determinação das propriedades de pasta realizada pelo analisador rápido de viscosidade (RVA) é utilizada para determinar o grau de conversão de amido pelo processo de extrusão (CARVALHO & MITCHELL, 2000; AL-RABADI et al. 2011).

Os resultados das propriedades de pasta: viscosidade inicial a 25 ºC, viscosidade máxima a 95 ºC, viscosidade mínima, viscosidade final, quebra da viscosidade (*breakdown*) e tendência à retrogradação (*setback*) estão apresentados nas Tabelas 9 e 10. Na Figura 16 estão dispostos os perfis de viscosidade para os seis genótipos de sorgo adicionados de 0% e 10% de açúcar.

Segundo a análise de variância para as variáveis respostas das propriedades de pasta, somente o fator % de açúcar influenciou os resultados de viscosidade inicial a 25 ºC (*Vi*). O fator açúcar e a interação dos fatores genótipo e % de açúcar influenciaram significativamente, a viscosidade máxima (*Vmax*) e tanto os fatores genótipo e % de açúcar, bem como a interação desses fatores influenciaram as demais variáveis respostas (Apêndices H e I).

Nota-se que processo de extrusão conduziu um perfil de viscosidade da pasta brando, ou seja, com valores baixos para os parâmetros viscosidade. As amostras extrudadas apresentaram pico de viscosidade inicial a 25 ºC e os resultados de (*Vi*) decaem após a adição de açúcar para todos os genótipos, exceto para BRS 501. Esses resultados indicam que a estrutura e o arranjo dos grânulos de amido nativo são completamente perdidos quando a extrusão é realizada na ausência de açúcares e que com a inclusão do açúcar parte dessa ordem molecular do amido é mantida devido efeito lubrificante do açúcar (FAN, MITCHELL & BLANSHARD, 1996a; ORTIZ et al. 2010). Comportamento de viscosidade de pasta

similar foi encontrado por Chávez et al. (2017), onde o pico de viscosidade inicial a 25 ºC diminuiu com a adição de café em extrudados de sorgo integral.

O genótipo BRS 501 apresentou maior valor de *Vi* após a adição de 10% de açúcar, portanto, neste genótipo, o efeito lubrificante do lipídio impediu a conversão do amido de forma mais eficaz que o açúcar. Em BRS 501 com 0% de açúcar (T2), o perfil de viscosidade apresentou ausência de pico de viscosidade a 25 ºC e aumento de viscosidade durante o ciclo de aquecimento, porém sem pico de viscosidade, e maior tendência à retrogradação (TR). Segundo Chávez et al. (2017), esse comportamento é típico de extrudado de farinha integral, onde existem proteínas e fibras e amido pouco danificado.

Para todos os tratamentos não houve pico de viscosidade a 95 ° C, ou seja, os valores de *Vmax* foram baixos, tanto para os tratamentos com 0% de açúcar quanto para os com 10% de açúcar. Esse comportamento indica o grau de modificação de amido devido as condições de temperatura e cisalhamento do processo de extrusão para produzir extrudados expandidos. Entretanto, em alguns tratamentos (T3, T4, T9, T10 e T12), observou-se uma curva de forma bimodal que indica presença de amido modificado capaz de absorver água à temperatura ambiente e vestígios ou fragmentos de amido nativo capazes de inchar resultando em aumento da viscosidade no aquecimento. Esse comportamento foi encontrado por Carvalho & Mitchell (2000) no processamento de extrusão de trigo e milho adicionados de açúcar, em diferentes concentrações. Este autor observou que houve diferença entre as curvas de viscosidade de extrudados de milho e de trigo. Os extrudados de milho apresentaram maior pico de viscosidade a quente (*Vmax*) do que os extrudados de trigo, o que foi atribuído a maior resistência ao cisalhamento do amido de milho e o efeito da redução do cisalhamento causado pelo teor de açúcar, por este ser composto por moléculas de menor massa molecular, assim reduzindo o esforço mecânico da extrusora.

Quando as pastas aquosas são arrefecidas, a extensão do aumento da viscosidade é conduzida pela tendência à retrogradação do amido (*TR*), ou seja, pela tendência à reassociação das moléculas de amido e dá-se pela diferença entre a viscosidade da pasta no final de um período de arrefecimento e a viscosidade mínima a 95 °C (WATERSCHOOT et al. 2015). Baixos valores de TR indicam presença de pouco amido que não sofreu conversão pela extrusão.

Tabela 9 Viscosidade inicial a 25 ºC, viscosidade máxima a 95 ºC e viscosidade mínima no resfriamento em função dos fatores: genótipo de sorgo e % de açúcar

Tratamento	Genótipo	% Açúcar	*Vi*	*Vmax*	*Vmin*
T1	BR 305	0	279,50 ± 136,64[a]	108,25 ± 25,62[cd]	69,25 ± 23,61[a]
T7	BR 305	10	153,50 ± 105,04[abc]	100,75 ± 22,65[d]	66,50 ± 22,75[a]
T2	BRS 501	0	69,50 ± 37,70[c]	214,25 ± 26,96[a]	205,00 ± 23,87[b]
T8	BRS 501	10	89,00 ± 9,49[c]	87,50± 29,78[d]	57,50 ± 26,03[a]
T3	BRS 330	0	255,00 ± 20,99[ab]	136,50 ± 25,99[bcd]	86,00 ± 29,61[a]
T9	BRS 330	10	72,75 ± 46,23[c]	122,00 ± 27,12[bcd]	71,75 ± 23,73[a]
T4	BRS 373	0	201,50 ± 15,86[abc]	181,00 ± 39,86[abc]	99,50 ± 25,04[a]
T10	BRS 373	10	95,25 ± 18,80[c]	188,50 ± 41,32[ab]	101,25 ± 34,60[a]
T5	SC 319	0	216,25 ± 60,93[abc]	86,50 ± 17,67[d]	52,00 ± 15,75[a]
T11	SC319	10	69,25 ± 50,68[c]	79,25 ± 31,49[d]	48,00 ± 27,77[a]
T6	CMSS 005	0	215,25 ± 84,52[abc]	109,50 ± 26,45[cd]	71,00 ± 30,39[a]
T12	CMSS 005	10	100,25 ± 34,54[bc]	110,75 ± 33,93[cd]	65,75 ± 0,00[a]

Vi: viscosidade inicial a 25 ºC (cP); *Vmax*: viscosidade máxima a 95 ºC (cP); *Vmin*: viscosidade mínima no resfriamento (cP); Os resultados expressam a média ± desvio padrão de *Vi*, *Vmax* e *Vmin*; Para todas as variáveis, n=4. Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

Tabela 10 Viscosidade final, quebra de viscosidade e tendência à retrogradação em função dos fatores: genótipos de sorgo e % de açúcar

Tratamento	Genótipo	% Açúcar	*Vfinal*	*QV*	*TR*
T1	BR 305	0	109,50 ± 23,91^{d}	39,00 ± 2,16^{bcd}	40,25 ± 3,10^{a}
T7	BR 305	10	112,25 ± 35,71^{d}	34,25 ± 2,06^{cd}	45,75 ± 13,82^{ae}
T2	BRS 501	0	370,75 ± 8,73^{a}	9,25 ± 3,30^{e}	165,75 ± 16,07^{b}
T8	BRS 501	10	127,50 ± 13,92^{d}	30,00± 4,24^{d}	70,00 ± 12,83^{acde}
T3	BRS 330	0	145,50 ± 23,91^{cd}	50,50 ± 4,51^{b}	59,50 ± 5,80^{acde}
T9	BRS 330	10	117,00 ± 20,80^{d}	50,25 ± 3,50^{bc}	45,25 ± 5,74^{ae}
T4	BRS 373	0	206,25 ± 22,23^{b}	81,50 ± 14,89^{a}	106,75 ± 6,18^{f}
T10	BRS 373	10	187,00 ± 21,97^{bc}	87,25 ± 6,99^{a}	85,75 ± 13,35^{cf}
T5	SC 319	0	107,50 ± 5,20^{d}	34,50 ± 4,20^{bcd}	55,50 ± 10,79^{ade}
T11	SC319	10	96,25 ±19,38^{d}	31,25 ± 3,86^{d}	48,25 ± 8,54^{ae}
T6	CMSS 005	0	142,25 ± 17,56^{cd}	38,50 ±5,45^{bcd}	71,25 ± 12,84^{cde}
T12	CMSS 005	10	145,50 ± 3,79^{cd}	45,00 ±10,10^{bcd}	79,75 ± 22,20^{cdf}

Vfinal: viscosidade final (cP); *QV*: quebra da viscosidade (cP); *TR*: tendência à retrogradação (cP); Os resultados expressam a média ± desvio padrão de *Vfinal*, *QV* e *TR*; Para todas as variáveis, n=4. Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

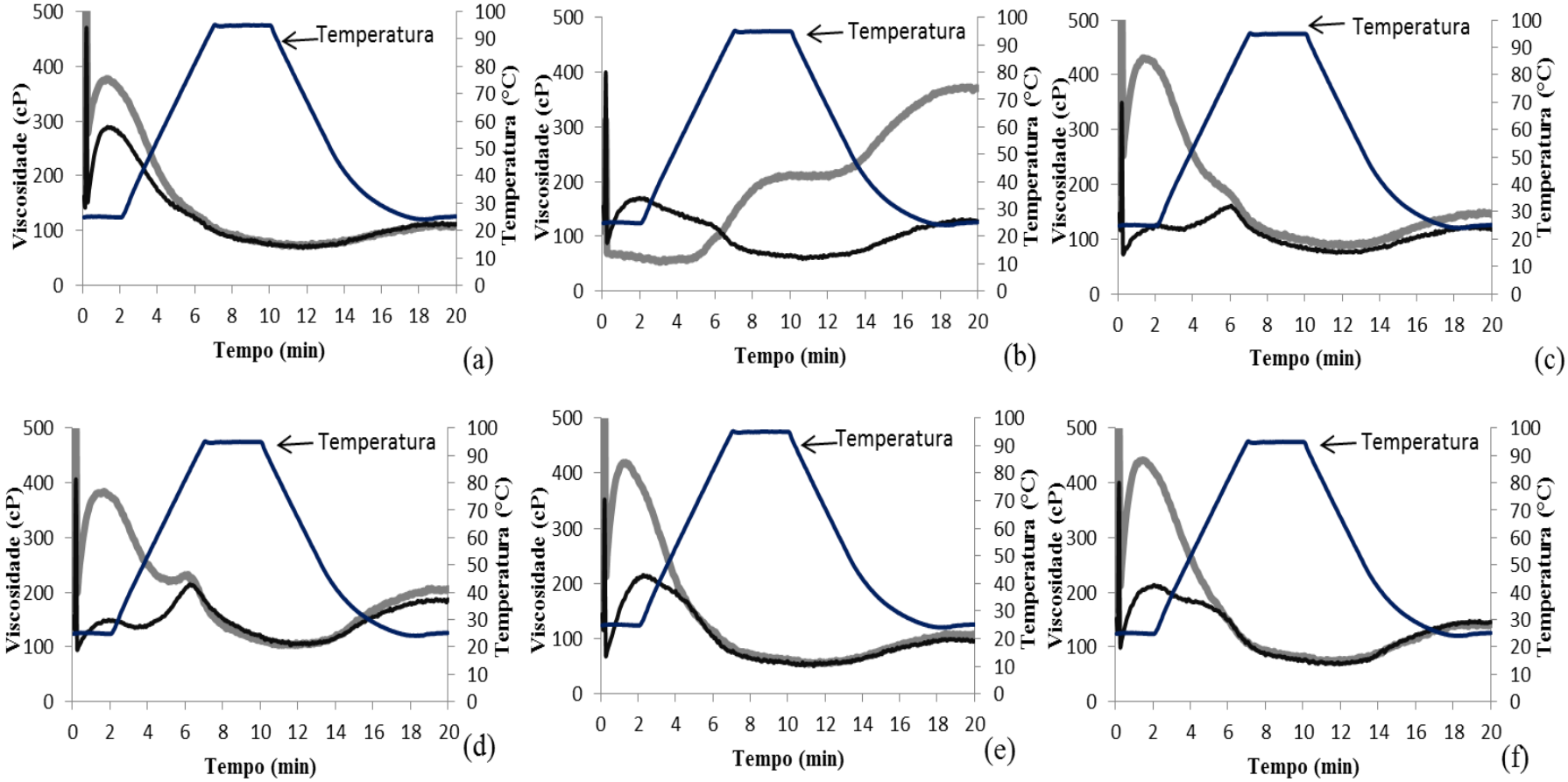


Figura 16 Gráficos do perfil de viscosidade de pasta em RVA. Linhas mais finas para 10% de açúcar e linhas mais grossas para 0% de açúcar, sendo (a) BR 305, (b) BRS 501, (c) BRS 330, (d) BRS 373, (e) SC 319, (f) CMSS 005.

4.5 Propriedades mecânicas dos extrudados

O comportamento das propriedades mecânicas dos extrudados de diferentes genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar está disposto na Tabela 10. No Apêndice J observa-se a análise de variância para todas das variáveis respostas que envolvem as propriedades mecânicas: Frequência de ruptura (Nsr), em mm^{-1}; Força específica de rupturas (Fsr), em N; Média das forças de compressão (Fc), em N; Trabalho de crocância (Wc), em $N.mm^{-1}$. Para todas essas variáveis, houve interação dos fatores genótipo e % de açúcar ($P < 0,05$).

A textura é uma propriedade muito importante para a qualidade sensorial de produtos expandidos fabricados a partir de cereais e amidos por meio de extrusão, que resulta não apenas em volume expandido, mas também em modificação microestrutural, e essa depende do tamanho das bolhas de ar que se formam e de como elas se organizam, bem como a espessura da parede celular nos extrudados (BOUVIER, BONNEVILLE & GOULLIEUX, 1997; MEZREB et al. 2006). A força de ruptura das células de ar é uma medida da resistência da parede celular e tem sido utilizada para correlacionar com o índice de expansão radial e com a densidade aparente, indicando que o aumento no tamanho dos poros, juntamente com uma diminuição da espessura da parede celular, resulta em extrudados de estrutura menos resistente (BOUVIER, BONNEVILLE & GOULLIEUX, 1997).

De acordo com a Tabela 10, consegue-se identificar que todas as variáveis referentes às propriedades mecânicas, apresentaram um comportamento linear para os tratamentos estudados. O genótipo BRS 501, com 0% de açúcar (tratamento T2), apresentou Fsr, Fc e Wc, significativamente, mais elevados que os outros tratamentos, e frequência de rupturas (Nsr) mais baixo e, significativamente, igual aos tratamentos T7 e T5, indicando maior resistência ao rompimento, que está relacionado com o seu baixo índice de expansão radial e com sua alta densidade aparente.

A força específica de rupturas (Fsr) variou de 0,38 a 12,04 N, sendo esse último valor referente ao BRS 501 com 0% de açúcar. Para os demais tratamentos, Fsr não apresentou diferença significativa entre eles, indicando que os tratamentos obtiveram uma homogeneidade em sua expansão e na espessura das paredes dos extrudados. Esse último resultado está de acordo com os resultados relatados por Pitts et al. (2014), que não encontrou diferença significativa para as forças de ruptura dos extrudados de milho em diferentes concentrações de açúcar e sal.

As médias das forças de compressão (Fc) variaram de 1,03 a 7,88 N e somente os genótipos BR 305 e BRS 501 apresentaram diferenças significativas entre seus tratamentos com 0% e 10% de açúcar, indicando uma estrutura mais compacta e poros menores para T7 (BR 305 com 10% de açúcar) em relação a T1 e para T2 (BRS 501 com 0%) em relação a T8.

O trabalho de crocância (Wc) variou de 0,15 a 3,11 $N.mm^{-1}$, sendo esse último valor referente ao BRS 501 com 0% de açúcar. Para os demais tratamentos, Wc não apresentou diferença significativa entre eles, evidenciando que, para extrudados de sorgo a adição de 10% de açúcar não alterou o grau de crocância. Mezreb et al. (2006) identificou que a adição de 5 a 10% de sacarose em trigo e em milho o trabalho de crocância não variou significativamente, porém os valores foram, significativamente, mais baixos comparados aos extrudados com 0% de açúcar, indicando que a adição de sacarose melhorou o produto em termos de crocância.

Tabela 10 Propriedades mecânicas dos extrudados em função dos fatores: genótipo de sorgo e % de açúcar

Tratamento	Genótipo	% Açúcar	Nsr (mm^{-1})	Fsr (N)	Fc (N)	Wc (N.mm)
T1	BR 305	0	$6,48 \pm 0,80^{abc}$	$0,45 \pm 0,08^{b}$	$1,67 \pm 0,40^{a}$	$0,26 \pm 0,06^{a}$
T7	BR 305	10	$5,74 \pm 2,81^{cd}$	$2,11 \pm 1,35^{b}$	$3,05 \pm 2,02^{b}$	$0,61 \pm 0,44^{a}$
T2	BRS 501	0	$3,95 \pm 2,82^{d}$	$12,04 \pm 12,54^{a}$	$7,88 \pm 3,08^{c}$	$3,11 \pm 3,82^{b}$
T8	BRS 501	10	$7,84 \pm 2,67^{abc}$	$1,01 \pm 0,55^{b}$	$2,04 \pm 1,02^{ab}$	$0,28 \pm 0,20^{a}$
T3	BRS 330	0	$6,91 \pm 2,56^{abc}$	$0,46 \pm 0,09^{b}$	$1,74 \pm 0,90^{a}$	$0,25 \pm 0,06^{a}$
T9	BRS 330	10	$7,09 \pm 2,72^{abc}$	$0,76 \pm 0,32^{b}$	$1,74 \pm 0,95^{a}$	$0,25 \pm 0,12^{a}$
T4	BRS 373	0	$7,31 \pm 2,89^{abc}$	$0,40 \pm 0,09^{b}$	$1,03 \pm 0,97^{a}$	$0,15 \pm 0,06^{a}$
T10	BRS 373	10	$8,66 \pm 2,94^{a}$	$1,12 \pm 0,85^{b}$	$2,07 \pm 0,99^{ab}$	$0,28 \pm 0,19^{a}$
T5	SC 319	0	$5,97 \pm 2,67^{bcd}$	$0,53 \pm 0,26^{b}$	$1,94 \pm 0,92^{ab}$	$0,34 \pm 0,12^{a}$
T11	SC319	10	$6,89 \pm 2,88^{abc}$	$1,04 \pm 0,51^{b}$	$2,25 \pm 0,96^{ab}$	$0,34 \pm 0,14^{a}$
T6	CMSS 005	0	$7,48 \pm 3,21^{abc}$	$0,38 \pm 0,08^{b}$	$1,14 \pm 0,79^{a}$	$0,16 \pm 0,06^{a}$
T12	CMSS 005	10	$8,19 \pm 3,77^{ab}$	$0,93 \pm 0,51^{b}$	$1,76 \pm 0,96^{a}$	$0,23 \pm 0,12^{a}$

Nsr: frequência de ruptura; Fsr: força específica de rupturas; Fc: média das forças de compressão; Wc: trabalho de crocância; Os resultados expressam a média ± desvio padrão; Para todas as variáveis, n=26. Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

4.6 Análises Químicas

4.6.1 Compostos fenólicos totais

Os compostos fenólicos são amplamente distribuídos nos vegetais e sua capacidade de eliminar radicais livres apresenta potenciais implicações benéficas para saúde humana (ANUNCIAÇÃO et al. 2017). No sorgo, os compostos fenólicos podem ser encontrados na forma livre ou associados a outros componentes, como os aminoácidos e os carboidratos (DYKES & ROONEY, 2006; QUEIROZ et al. 2012).

O processo de extrusão tem um efeito negativo na quantidade de compostos fenólicos. Segundo Chávez et al. (2017), temperaturas superiores a 80 ºC promovem mudanças na estrutura fenólica, resultando na redução da sua reatividade química e extração. No entanto, Brennan et al. (2011) relataram que o teor de compostos bioativos nos alimentos pode aumentar após processamento por extrusão e depende das variáveis do processo. O aumento nos níveis de compostos fenólicos em produtos extrudados pode ser explicado devido maior exposição destes compostos após a fragmentação dos tecidos vegetais durante a extrusão, levando ao rompimento de constituintes celulares (parede celular).

Segundo Apêndice K, a análise de variância para os compostos fenólicos totais indica que o fator genótipo interferiu significativamente para os resultados ($P < 0,05$) e a % de açúcar não interferiu ($P \geq 0,05$), entretanto, houve interação entre os fatores ($P < 0,05$). Os resultados do teor de compostos fenólicos presentes nos tratamentos de extrusão realizados encontram-se na Tabela 11 e variou de 1,54 a 7,72 mg AG/g. Segundo Anunciação et al. (2017), o conteúdo de compostos fenólicos pode ser superestimado devido à ação de interferentes, como proteínas, ácidos nucleicos e aminoácidos, que podem reagir com o Reagente de Folin-Ciocalteu.

Tabela 11 Teor de compostos fenólicos totais em função dos diferentes genótipos de sorgo e % de açúcar

Tratamento	Genótipo	% Açúcar	CFT
T1	BR 305	0	4,63 ± 0,48 ^{bc}
T7	BR 305	10	4,91 ± 0,64 ^{b}
T2	BRS 501	0	1,68 ± 0,16 ^{g}
T8	BRS 501	10	1,54 ± 0,56 ^{g}
T3	BRS 330	0	2,22 ± 0,56 ^{fg}
T9	BRS 330	10	2,66 ± 0,51 ^{ef}
T4	BRS 373	0	3,40 ± 0,44 ^{de}
T10	BRS 373	10	2,97 ± 0,27 ^{ef}
T5	SC 319	0	7,72 ± 0,29 a
T11	SC319	10	7,23 ± 0,55 ^{a}
T6	CMSS 005	0	3,83 ± 0,13 ^{cd}
T12	CMSS 005	10	4,23 ± 0,38 ^{bcd}

CFT: compostos fenólicos totais, expressos em mg AG/g. Os resultados expressam a média ± desvio padrão. Para CFT, n= 6. Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

A adição de açúcar não interferiu significativamente o conteúdo de compostos fenólicos totais entre os tratamentos do mesmo genótipo. Nota-se que os genótipos de coloração marrom (BR 305 e SC 319) apresentaram os maiores níveis de compostos fenólicos, tal fato pode ser explicado quando os genótipos de sorgo possuem testa pigmentada e glumas mais escuras aderidas aos grãos (AUDILAKSHMI et al. 1999). Além disso, ambos apresentaram taninos condensados em sua composição (Tabela 3), o que aumenta o conteúdo de compostos fenólicos nos grãos.

4.6.2. Taninos condensados

O conteúdo de taninos condensados dos extrudados de genótipos de sorgo com 0% de 10% de açúcar estão dispostos na Tabela 12.

Os grãos integrais dos genótipos BR 305 e SC 319 apresentaram 4,48 e 1,72 $mg.100g^{-1}$, respectivamente. Após a extrusão, ambos apresentaram redução no conteúdo de taninos. O genótipo BR 305 com 0% de açúcar apresentou 0,05 $mg.100g^{-1}$, no entanto, a adição de 10% de açúcar na extrusão do mesmo genótipo, reteve um conteúdo maior de taninos, 1,11 $mg.100g^{-1}$. Portanto, a adição de açúcar pode ter protegido os taninos durante a extrusão, evitando sua degradação devido o seu efeito plastificante, que diminui o tempo de residência do material na extrusora. Observa-se que, para os tratamentos com SC 319 não houve concentração de tanino detectável.

A redução no teor de taninos em uma matriz alimentar, após a extrusão, é esperada. Mkandawire et al. (2015), encontraram uma redução de 90% no conteúdo de taninos de sorgo vermelho após a extrusão termoplástica de farinha de sorgo integral com açúcar. Tal comportamento pode ser explicado devido à degradação dos taninos pelo calor, embora seja possível que a extrusão facilite a formação de complexos de tanino-proteína insolúveis, impedindo a sua extração. Porém, em recente estudo de Adarkwah-Yiadom & Duodu (2017), para determinar o efeito da extrusão em taninos condensados do sorgo integral, concluiu-se que o cozimento por extrusão diminui os níveis de taninos condensados em relação ao grão não processado, pois o processamento diminui a proporção de unidades oligoméricas de proantocianidina, no entanto aumenta a proporção de unidades monoméricas e diméricas, tornando as estruturas moleculares dos taninos menores e mais solúveis.

Tabela 12 Teor de taninos condensados em função dos diferentes genótipos de sorgo e % de açúcar

Tratamento	Genótipo	% Açúcar	Taninos condensados
T1	BR 305	0	$0,05 \pm 0,05^{a}$
T7	BR 305	10	$1,11 \pm 0,11^{b}$
T5	SC 319	0	ND
T11	SC 319	10	ND

ND: não detectável pela metodologia. Os resultados expressam a média ± desvio padrão de taninos condensados, em $mg.100g^{-1}$, n=6. Colunas com letras diferentes apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

5 CONCLUSÕES

A extrusão de diferentes genótipos de sorgo com 0% de açúcar e 10% de açúcar, sob as mesmas condições de processamento, resultaram num efeito significativo sobre as variáveis dependentes (EME e torque) e nas propriedades físico-químicas (densidade aparente, IER, IAA e ISA). Composições químicas diferentes entre genótipos de sorgo podem afetar as condições de extrusão. O tratamento BRS 501 com 0% de açúcar apresentou um comportamento distinto dos outros tratamentos, possivelmente, devido o seu maior teor de lipídio. O resultado de EME foi similar para BR 305, BRS 330, BRS 373, SC 319 e CMSS 005. Os tratamentos com 0% de açúcar apresentaram os maiores valores de IER e menores valores de densidade aparente, indicando que a adição de açúcar diminui a expansão dos extrudados produzidos a partir de sorgo integral.

Os valores encontrados de índice de solubilidade em água e índice de absorção de água indicam redução do peso molecular do amido para tratamentos com 0%, com exceção de BRS 501, e baixa capacidade de formar um gel em água fria tanto para os tratamentos com 0% de açúcar quanto para os com 10% de açúcar.

Foram encontrados em todos os tratamentos, níveis de compostos fenólicos totais indicando que extrudados de sorgo podem ser uma boa fonte de compostos bioativos. Os taninos condensados foram encontrados nos genótipos BR 305 e SC 319. Após a extrusão, ambos apresentaram redução no conteúdo de taninos, porém a adição de 10% de açúcar na extrusão de BR 305 reteve um conteúdo maior de taninos, 1,11 $mg.100g^{-1}$, indicando que a adição de açúcar pode ter protegido os taninos durante a extrusão, evitando sua degradação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADARKWAH-YIADOM, M.; DUODU, K. G. Effect of extrusion cooking and simulated in vitro gastrointestinal digestion on condensed tannins and radical scavenging activity of type II and type III whole grain sorghum. **International Journal of Food Science & Technology**, p. n/a-n/a, 2017.

ADEYANJU, A.; PERUMAL, R.; TESSO, T. Genetic analysis of threshability in grain sorghum [Sorghum bicolor (L.) Moench]. **Plant Breeding,** v. 134, n. 2, p. 148-155, 2015.

AJITA, T.; JHA, S. K. Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks - An overview. **International Journal of Food Studies,** v. 6, n. 1, p. 113-128, 2017.

AL-RABADI, G. J. et al. Particle size of milled barley and sorghum and physico-chemical properties of grain following extrusion. **Journal of Food Engineering,** v. 103, n. 4, p. 464-472, 2011.

ALTHWAB, S. et al. Advances in grain sorghum and its co-products as a human health promoting dietary system. **Food Research International**, 2015.

ALVAREZ-MARTINEZ, L.; KONDURY, K. P.; HARPER, J. M. A General Model for Expansion of Extruded Products. **Journal of Food Science,** v. 53, n. 2, p. 609-615, 1988.

ANDERSON, R. A.; CONWAY, H. F.; PEPLINSKI, A. J. Gelatinization of Corn Grits by Roll Cooking, Extrusion Cooking and Steaming. **Starch - Stärke,** v. 22, n. 4, p. 130-135, 1969.

ANUNCIAÇÃO, P. C. et al. Comparing sorghum and wheat whole grain breakfast cereals: Sensorial acceptance and bioactive compound content. **Food Chemistry,** v. 221, p. 984-989, 2017.

AOAC. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemistry. 16th edition. Arlington: Washington, 2005.

AOAC. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY. Approved Methods of the American Association of Official Analytical Chemists, 18th edition, 3th rev. Gaithersburg: USA, 2010.

AOCS. American Oil Chemists' Society. Official Method Am 5-04, rapid determination of oil/fat utilizing high temperature solvent extraction. Urbana: 'Official Methods and Recommended Pratices of the American Oil Chemists' Society, 2009.

AUDILAKSHMI, S. et al. Grain mould resistance and associated characters of sorghum genotypes. **Euphytica,** v. 107, n. 2, p. 91-103, 1999.

AWIKA, J. M.; ROONEY, L. W. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. **Phytochemistry,** v. 65, n. 9, p. 1199-1221, 2004.

BARRETT, A. et al. Effect of sucrose on the structure, mechanical strength and thermal properties of corn extrudates. **Carbohydrate Polymers,** v. 26, n. 4, p. 261-269, 1995.

BERRIOS, J. DE J. et al. Carbohydrate composition of raw and extruded pulse flours. **Food Research International,** v. 43, n. 2, p. 531 - 536, 2010.

BORBA, A. M.; SARMENTO, S.; LEONEL, M. Effect of extrusion parameters on sweet potato extrudates. **Food Science and Technology (Campinas),** v. 25, n. 4, p. 835-843, 2005.

BORGES, T. P. **Classificação e métodos de cozimento de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench) em grãos**. 2013. Universidade Federal de Viçosa, Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Viçosa.

BOUDRIES, N. et al. Physicochemical and functional properties of starches from sorghum cultivated in the Sahara of Algeria. **Carbohydrate Polymers,** v. 78, n. 3, p. 475-480, 2009.

BOUVIER, J.; BONNEVILLE, R.; GOULLIEUX, A. Instrumental methods for the measurement of extrudate crispness. **Agro Food Industry Hi-tech,** v. 8, n. 1, p. 16-19, 1997. ISSN 1120-6012.

BRASIL. Agencia nacional de vigilância sanitária. Resolução RDC n° 360, de 23 de dezembro de 2003. Aprova regulamento técnico sobre rotulagem nutricional de alimentos embalados. D.O.U. – Diário oficial da União; Poder executivo, de 26 de dezembro de 2003.

BRENNAN, C. et al. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. **Trends in Food Science & Technology,** v. 22, n. 10, p. 570-575, 2011.

BRENNAN, M. A. et al. Ready-to-eat snack products: the role of extrusion technology in developing consumer acceptable and nutritious snacks. **International Journal of Food Science & Technology,** v. 48, n. 5, p. 893-902, 2013.

BURNS, R. E. Method for Estimation of Tannin in Grain Sorghum1. **Agronomy Journal,** v. 63, n. 3, p. 511-512, 1971.

CARDOSO, L. D. M. et al. Sorghum (Sorghum bicolor L.): Nutrients, bioactive compounds, and potential impact on human health. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition,** v. 57, n. 2, p. 372-390, 2015/01/22 2015

CARVALHO, C. W. P.; ASCHERI, R. L. J. Effect of dry-milling on physicochemical characteristics of white corn extrudates. **Alimentaria**, n. 305, p. 115-119, 1999.

CARVALHO, C. W. P.; MITCHELL, J. R. Effect of sugar on the extrusion of maize grits and wheat flour. **International Journal of Food Science and Technology,** v. 35, n. 6, p. 569-576, 2000.

CARVALHO, C. W. P. et al. Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: Effect of particle size on the extrusion of corn meal. **Journal of Food Engineering,** v. 98, n. 1, p. 103-109, 2010.

CHÁVEZ, D. W. H. **Efeito do processamento por extrusão de farinha mista de pó de café e sorgo nas características tecnologicas e capacidade antioxidante.** Dissertação 2014. 117p. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Seropédica.

CHÁVEZ, D. W. H. et al. Sorghum and roasted coffee blends as a novel extruded product: Bioactive compounds and antioxidant capacity. **Journal of Functional Foods,** v. 29, p. 93-103, 2017.

CHEN, F. L. et al. System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range. **Journal of Food Engineering,** v. 96, n. 2, p. 208-213, 2010.

DE MESA-STONESTREET, N. J.; ALAVI, S.; BEAN, S. R. Sorghum Proteins: The Concentration, Isolation, Modification, and Food Applications of Kafirins. **Journal of Food Science,** v. 75, n. 5, p. R90-R104, 2010

DE PILLI, T. et al. Effect of proteins on the formation of starch–lipid complexes during extrusion cooking of wheat flour with the addition of oleic acid. **International Journal of Food Science & Technology,** v. 50, n. 2, p. 515-521, 2015

DESHPANDE, S. S.; CHERYAN, M. Evaluation of Vanillin Assay for Tannin Analysis of Dry Beans. **Journal of Food Science,** v. 50, n. 4, p. 905-910, 1985.

DLAMINI, N. R.; TAYLOR, J. R. N.; ROONEY, L. W. The effect of sorghum type and processing on the antioxidant properties of African sorghum-based foods. **Food Chemistry,** v. 105, n. 4, p. 1412-1419, 2007

DYKES, L.; ROONEY, L. W. Sorghum and millet phenols and antioxidants. **Journal of Cereal Science,** v. 44, n. 3, p. 236-251, 2006.

EARP, C. F.; MCDONOUGH, C. M.; ROONEY, L. W. Microscopy of pericarp development in the caryopsis of Sorghum bicolor (L.) Moench. **Journal of Cereal Science,** v. 39, n. 1, p. 21-27, 2004.

EMBRAPA, 2008. Cultivo de Sorgo – Mercado e Comercialização. Disponível em: < http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo_4_ed/mercado.htm > Acesso em: 13/11/2016.

FAN, J.; MITCHELL, J. R.; BLANSHARD, J. M. V. The effect of sugars on the extrusion of maize grits: I. The role of the glass transition in determining product density and shape. **International Journal of Food Science & Technology,** v. 31, n. 1, p. 55-65, 1996a

FAN, J.; MITCHELL, J. R.; BLANSHARD, J. M. V. The effect of sugars on the extrusion of maize grits: II. Starch conversion. **International Journal of Food Science & Technology,** v. 31, n. 1, p. 67-76, 1996b. I

FANG, Y.; ZHANG, B.; WEI, Y. Effects of the specific mechanical energy on the physicochemical properties of texturized soy protein during high-moisture extrusion cooking. **Journal of Food Engineering,** v. 121, p. 32-38, 2014.

FAO, 2017. Food and Agriculture Organization of the United States Nations. Disponível em: < http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E > Acesso em: 23/2/2017.

FELLOWS, P. J. Tecnologia do processamento de alimentos: Princípios e prática 2 ed.Porto Alegre: Artmed, 2006. 602 p.

GUPTA, U. C.; GUPTA, S. C. Sources and Deficiency Diseases of Mineral Nutrients in Human Health and Nutrition: A Review. **Pedosphere,** v. 24, n. 1, p. 13-38, 2014/02/01 2014.

HSIEH, F.; PENG, I. C.; HUFF, H. E. Effects of Salt, Sugar and Screw Speed on Processing and Product Variables of Corn Meal Extruded with a Twin-Screw Extruder. **Journal of Food Science,** v. 55, n. 1, p. 224-227, 1990.

JAFARI, M.; KOOCHEKI, A.; MILANI, E. Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates. **Journal of Cereal Science,** v. 75, p. 324-331, 2017.

JIN, Z.; HSIEH, F.; HUFF, H. E. Effects of soy fiber, salt, sugar and screw speed on physical properties and microstructure of corn meal extrudate. **Journal of Cereal Science,** v. 22, n. 2, p. 185-194, 1995.

MAKARAVICIUS, T. et al. Production of oligosaccharides from extruded wheat and rye biomass using enzymatic treatment. **Catalysis Today,** v. 196, n. 1, p. 16-25, 11/30/ 2012.

MARTINO , H. S. D. et al. Chemical characterization and size distribution of sorghum genotypes for human consumption. **Revista do Instituto Adolfo Lutz (Impresso),** v. 71, p. 337-344, 2012.

MEZREB, K. et al. Effect of sucrose on the textural properties of corn and wheat extrudates. **Carbohydrate Polymers,** v. 64, n. 1, p. 1-8, 4/19/ 2006.

MKANDAWIRE, N. L. et al. Composition, in vitro digestibility, and sensory evaluation of extruded whole grain sorghum breakfast cereals. **LWT - Food Science and Technology,** v. 62, n. 1, Part 2, p. 662-667, 6// 2015

MOHARRAM, Y. G.; YOUSSEF, A. M. A. Sorghum grain and quality of its edible products. In: GEORGE, C. (Ed.). **Developments in Food Science**: Elsevier, v.Volume 37, 1995. p.111-146.

MOJICA, L.; BERHOW, M.; GONZALEZ DE MEJIA, E. Black bean anthocyanin-rich extracts as food colorants: Physicochemical stability and antidiabetes potential. **Food Chemistry,** v. 229, p. 628-639, 8/15/ 2017.

MORAES, É. A. et al. Sorghum flour fractions: Correlations among polysaccharides, phenolic compounds, antioxidant activity and glycemic index. **Food Chemistry,** v. 180, p. 116-123, 8/1/ 2015.

NASCIMENTO, E. M. D. G. C. D. et al. Use of sesame oil cake (Sesamum indicum L.) on corn expanded extrudates. **Food Research International,** v. 45, n. 1, p. 434-443, 2012.

NIKMARAM, N. et al. Effect of extrusion on the anti-nutritional factors of food products: An overview. **Food Control,** v. 79, p. 62-73, 9// 2017.

OLIVEIRA, L. C.; SCHMIELE, M.; STEEL, C. J. Development of whole grain wheat flour extruded cereal and process impacts on color, expansion, and dry and bowl-life texture. **LWT - Food Science and Technology,** v. 75, p. 261-270, 2017.

ORTIZ, J. A. R. et al. Effect of sugar and water contents on non-expanded cassava flour extrudates. **Food Science and Technology (Campinas),** v. 30, p. 205-212, 2010.

PITTS, K. F. et al. Co-effect of salt and sugar on extrusion processing, rheology, structure and fracture mechanical properties of wheat–corn blend. **Journal of Food Engineering,** v. 127, p. 58-66, 2014. I

QUEIROZ, V. A. V. et al. Potencial funcional e tecnologia de processamento do sorgo [sorghum bicolor (l.) moench], para alimentação humana. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo,** v. 10, n. 3, p. 180-195, 2012. ISSN 1980-6477.

RING, A. S.; WANISKA, R. D.; ROONEY, L. W. Phenolic compounds in different sorghum tissues during maturation. **Biomass,** v. 17, n. 1, p. 39-49, 1988.

SAURA-CALIXTO, F.; GOÑI, I. Antioxidant capacity of the Spanish Mediterranean diet. **Food Chemistry,** v. 94, n. 3, p. 442-447,2006.

SHEVKANI, K. et al. Composition, Rheological and Extrusion Behaviour of Fractions Produced by Three Successive Reduction Dry Milling of Corn. **Food and Bioprocess Technology,** v. 7, n. 5, p. 1414-1423, 2014.

SHUKLA, C. Y.; MUTHUKUMARAPPAN, K.; JULSON, J. L. Effect of Single-Screw Extruder Die Temperature, Amount of Distillers' Dried Grains With Solubles (DDGS), and Initial Moisture Content on Extrudates. **Cereal Chemistry Journal,** v. 82, n. 1, p. 34-37, 2005.

SINGH, J.; DARTOIS, A.; KAUR, L. Starch digestibility in food matrix: a review. **Trends in Food Science & Technology,** v. 21, n. 4, p. 168-180, 4// 2010. ISSN 0924-2244.

SINGH, S.; GAMLATH, S.; WAKELING, L. Nutritional aspects of food extrusion: a review. **International Journal of Food Science & Technology,** v. 42, n. 8, p. 916-929, 2007.

SOETAN, K.; OLAIYA, C.; OYEWOLE, O. The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants-A review. **African Journal of Food Science,** v. 4, n. 5, p. 200-222, 2010. ISSN 1996-0794.

TAYLOR, J.; NAUSHAD EMMAMBUX, M. Developments in our understanding of sorghum polysaccharides and their health benefits. **Cereal chemistry,** v. 87, n. 4, p. 263-271, 2010.

TAYLOR, J. R. N.; SCHOBER, T. J.; BEAN, S. R. Novel food and non-food uses for sorghum and millets. **Journal of Cereal Science,** v. 44, n. 3, p. 252-271, 2006.

THAKUR, S. et al. Effect of Extrusion on Physicochemical Properties, Digestibility, and Phenolic Profiles of Grit Fractions Obtained from Dry Milling of Normal and Waxy Corn. **Journal of Food Science**, p. n/a-n/a, 2017.

VARGAS-SOLÓRZANO, J. W. **Obtenção e caracterização de farinha extrudada de diferentes genótipos de sorgo para o desenvolvimento de biscoitos doces**. Dissertação 2013. 114p. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Seropédica.

VARGAS-SOLÓRZANO, J. W. et al. Physicochemical properties of expanded extrudates from colored sorghum genotypes. **Food Research International,** v. 55, p. 37-44, 2014.

WATERSCHOOT, J. et al. Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches. **Starch - Stärke,** v. 67, n. 1-2, p. 14-29, 2015

WU, G. et al. Changes in whole grain polyphenols and antioxidant activity of six sorghum genotypes under different irrigation treatments. **Food Chemistry,** v. 214, p. 199-207, 2017.

ZHU, F. Structure, Physicochemical Properties, Modifications, and Uses of Sorghum Starch. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,** v. 13, n. 4, p. 597-610, 2014

APÊNDICES

Apêndice A Distribuição granulométrica das farinhas de sorgo integral

Genótipo	R_n (g.100g^{-1})							
	$R_{1,680}$	$R_{1,400}$	$R_{1,180}$	$R_{1,000}$	$R_{0,710}$	$R_{0,300}$	$R_{0,106}$	Fundo
BR 305	2,70 ± 0,10^{bc}	9,27 ± 0,23^{b}	17,47 ± 0,42^{b}	24,30 ± 0,44^{ab}	22,53 ± 0,47^{b}	12,73 ± 0,29^{b}	9,37 ± 0,06^{a}	1,63 ± 0,21^{ab}
BRS 501	5,07 ± 0,60^{a}	14,33 ± 0,64^{a}	19,17 ± 0,29^{a}	22,90 ± 0,40^{b}	17,83 ± 0,97^{d}	12,53 ± 0,35^{b}	7,83 ± 0,29^{bc}	0,77 ± 0,15^{b}
BRS 330	2,57 ± 0,25^{c}	10,47 ± 0,31^{b}	17,97 ± 0,21^{b}	23,73 ± 0,97^{b}	20,40 ± 0,61^{c}	12,87 ± 0,57^{b}	9,50 ± 0,82^{a}	2,50 ± 0,52^{a}
BRS 373	4,33 ± 0,49^{ab}	13,10 ± 0,4^{a}	19,57 ± 0,50^{a}	23,63 ± 0,35^{b}	18,67 ± 0,40^{d}	11,93 ± 0,49^{b}	7,13 ± 0,40^{c}	1,63 ± 0,31^{ab}
SC 319	2,43 ± 0,51^{c}	9,47 ± 0,81^{b}	17,77 ± 0,15^{b}	25,27 ± 0,23^{a}	23,23 ± 0,25^{b}	12,20 ± 0,70^{b}	7,20 ± 0,40^{c}	2,47 ± 0,46^{a}
CMSS 005	3,40 ± 0,53^{bc}	9,57 ± 0,25^{b}	13,23 ± 0,64^{c}	19,30 ± 0,50^{c}	25,37 ± 0,47^{a}	18,63 ± 0,47^{a}	8,73 ± 0,81^{bc}	1,77 ± 0,25^{a}

Os resultados expressam a média ± desvio padrão das massas em g.100g^{-1}que foram retidas após o peneiramento por 10 minutos (n=3). n=6. As médias com letras diferentes, dentro da mesma fila possuem diferença significativa, segundo teste Tukey ($P < 0,05$).

Apêndice B Respostas das variáveis dependentes da extrusão: energia mecânica específica (EME) e torque dos seis genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Tratamento	Genótipo	% Açúcar	EME ($kJ.kg^{-1}$)	Torque (Nm)
T1	BR 305	0	$472,41 \pm 61,73^{a}$	$20,69 \pm 0,49^{a}$
T7	BR 305	10	$387,90 \pm 132,01^{ab}$	$18,86 \pm 5,15^{a}$
T2	BRS 501	0	$159,46 \pm 28,32^{b}$	$8,95 \pm 0,55^{b}$
T8	BRS 501	10	$342,41 \pm 66,94^{ab}$	$18,51 \pm 3,54^{a}$
T3	BRS 330	0	$465,26 \pm 77,62^{a}$	$21,91 \pm 1,86^{a}$
T9	BRS 330	10	$386,76 \pm 49,05^{ab}$	$19,39 \pm 1,75^{a}$
T4	BRS 373	0	$432,06 \pm 72,93^{a}$	$21,03 \pm 2,09^{a}$
T10	BRS 373	10	$391,89 \pm 29,10^{ab}$	$20,15 \pm 0,24^{a}$
T5	SC 319	0	$428,06 \pm 55,81^{a}$	$20,07 \pm 1,47^{a}$
T11	SC319	10	$373,42 \pm 26,70^{ab}$	$18,67 \pm 1,21^{a}$
T6	CMSS 005	0	$462,84 \pm 54,98^{a}$	$21,36 \pm 1,65^{a}$
T12	CMSS 005	10	$355,28 \pm 46,73^{ab}$	$17,48 \pm 3,10^{ab}$

Os resultados expressam a média ± desvio padrão de EME e Torque; Para todas as variáveis, n=2. As médias com letras diferentes, dentro da mesma coluna possuem diferença significativa, segundo teste Tukey ($P < 0,05$).

Apêndice C Análises de variância para as variáveis dependentes: índice de expansão radial (IER) e densidade aparente ($\rho_{aparente}$) dos extrudados de diferentes genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Resposta	Fonte	SQ	GL	QM	F	Valor P
IER	Genótipo	348,65	5	69,73	60,59	< 0,0001
	% Açúcar	24,83	1	24,83	21,58	< 0,0001
	Genótipo*% Açúcar	439,25	5	87,85	76,33	< 0,0001
	Resíduos	260,10	226	1,15		
	Total	1072,83	237			
$\rho_{aparente}$ ($g.cm^{-3}$)	Genótipo	10,01	5	2,00	697,32	< 0,0001
	% Açúcar	0,15	1	0,15	52,97	< 0,0001
	Genótipo*% Açúcar	10,26	5	2,05	714,80	< 0,0001
	Resíduos	0,65	226	0,00		
	Total	21,07	237			

SM: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; Valor P: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5,0%; n=20.

Apêndice D Respostas das variáveis dependentes: índice de expansão radial (IER) e densidade aparente ($\rho_{aparente}$) para os seis genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Tratamento	Genótipo	% Açúcar	IER	$\rho_{aparente}$ ($g.cm^{-3}$)
T1	BR 305	0	$7,43 \pm 1,28^{a}$	$0,14 \pm 0,02^{a}$
T7	BR 305	10	$5,70 \pm 1,15^{c}$	$0,32 \pm 0,05^{b}$
T2	BRS 501	0	$1,18 \pm 0,06^{b}$	$1,29 \pm 0,04^{c}$
T8	BRS 501	10	$6,56 \pm 2,17^{acef}$	$0,28 \pm 0,12^{bd}$
T3	BRS 330	0	$7,62 \pm 0,98^{ad}$	$0,14 \pm 0,01^{a}$
T9	BRS 330	10	$6,23 \pm 0,75^{cef}$	$0,24 \pm 0,05^{d}$
T4	BRS 373	0	$8,63 \pm 0,92^{dg}$	$0,12 \pm 0,01^{a}$
T10	BRS 373	10	$6,99 \pm 1,24^{af}$	$0,25 \pm 0,06^{d}$
T5	SC 319	0	$6,85 \pm 0,63^{aef}$	$0,15 \pm 0,01^{a}$
T11	SC319	10	$5,92 \pm 0,66^{cef}$	$0,26 \pm 0,07^{d}$
T6	CMSS 005	0	$9,07 \pm 0,50^{g}$	$0,12 \pm 0,01^{a}$
T12	CMSS005	10	$5,84 \pm 1,03^{ce}$	$0,26 \pm 0,08^{bd}$

Os resultados expressam a média ± desvio padrão de IER e $\rho_{aparente}$; Para todas as variáveis, n=20. As médias com letras diferentes, dentro da mesma coluna possuem diferença significativa, segundo teste Tukey ($P < 0,05$).

Apêndice E Análises de variância para as variáveis dependentes: índice de solubilidade em água (ISA) e índice de absorção de água (IAA) para os extrudados de diferentes genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Resposta	Fonte	SQ	GL	QM	F	Valor P
ISA	Genótipo	946,82	5	189,360	94,243	< 0,0001
	% Açúcar	33,41	1	33,415	16,630	0,0001
	Genótipo*% Açúcar	542,60	5	108,521	54,009	< 0,0001
	Residuos	120,56	60	2,009		
	Total	1643,40	71			
IAA	Genótipo	2,877	5	0,575	12,749	< 0,0001
	% Açúcar	1,261	1	1,261	27,937	< 0,0001
	Genótipo*% Açúcar	1,406	5	0,281	6,229	0,0001
	Residuos	2,708	60	0,045		
	Total	8,251	71			

SM: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; Valor P: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5,0%.

Apêndice F Análise de variância dos parâmetros de cor (L*, a* e b*) para os extrudados de diferentes genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Resposta	Fonte	SQ	GL	QM	F	Valor P
L*	Genótipo	7615,27	5	1523,05	5650,57	< 0,0001
	% Açúcar	34,27	1	34,27	127,15	< 0,0001
	Genótipo*% Açúcar	62,51	5	12,50	46,38	< 0,0001
	Resíduos	22,64	84	0,27		
	Total	7734,70	95			
a*	Genótipo	738,29	5	147,66	7022,81	< 0,0001
	% Açúcar	0,75	1	0,75	35,88	< 0,0001
	Genótipo*% Açúcar	11,10	5	2,22	105,63	< 0,0001
	Resíduos	1,77	84	0,02		
	Total	751,91	95			
b*	Genótipo	343,97	5	68,79	283,27	< 0,0001
	% Açúcar	0,000	1	0,00	0,00	0,9690
	Genótipo*% Açúcar	27,87	5	5,57	22,95	< 0,0001
	Resíduos	20,40	84	0,24		
	Total	392,24	95			

SM: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; Valor P: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5,0%; Para L*, a* e b* n=8.

Apêndice G Análise de variância dos parâmetros de cor (C*, hº e *WI*) para os extrudados de diferentes genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Resposta	Fonte	SQ	GL	QM	F	Valor P
C*	Genótipo	246,26	5	49,25	201,64	< 0,0001
	% Açúcar	0,38	1	0,38	1,55	0,2170
	Genótipo*% Açúcar	33,90	5	6,78	27,75	< 0,0001
	Resíduos	20,52	84	0,24		
	Total	301,05	95			
hº	Genótipo	8468,93	5	1693,79	8630,554	< 0,0001
	% Açúcar	4,11	1	4,11	20,956	< 0,0001
	Genótipo*% Açúcar	55,82	5	11,16	56,887	< 0,0001
	Resíduos	16,48	84	0,20		
	Total	8545,35	95			
WI	Genótipo	5951,14	5	1190,23	3471,043	< 0,0001
	% Açúcar	30,55	1	30,55	89,082	< 0,0001
	Genótipo*% Açúcar	90,01	5	18,00	52,499	< 0,0001
	Resíduos	28,80	84	0,34		
	Total	6100,50	95			

SM: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; Valor P: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5,0%; Para C*, hº e *WI* n=8.

Apêndice H Análise de variância dos parâmetros de viscosidade de pasta: *Vi*, *Vmax* e *Vmin* para os extrudados de diferentes genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Resposta	Fonte	SQ	GL	QM	F	Valor P
Vi	Genótipo	77788,42	5	15557,68	3,81	0,007
	% Açúcar	143883,00	1	143883,00	35,22	< 0,0001
	Genótipo*% Açúcar	47305,75	5	9461,15	2,32	0,064
	Residuos	147056,50	36	4084,90		
	Total	416033,67	47			
Vmax	Genótipo	53185,19	5	10637,04	11,99	< 0,0001
	% Açúcar	7227,52	1	7227,52	8,15	0,007
	Genótipo*% Açúcar	25657,35	5	5131,47	5,79	0,001
	Residuos	31932,75	36	887,02		
	Total	118002,81	47			
Vmin	Genótipo	33426,92	5	6685,38	9,85	< 0,0001
	% Açúcar	9861,33	1	9861,33	14,53	0,001
	Genótipo*% Açúcar	34165,67	5	6833,13	10,07	< 0,0001
	Residuos	24432,00	36	678,67		
	Total	101885,92	47			

Vi: viscosidade inicial a 25 ºC (cP); *Vmax*: viscosidade máxima a 95 ºC (cP); *Vmin*: viscosidade mínima no resfriamento (cP); SM: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; Valor P: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5,0%; Para *Vi*, *Vmax* e *Vmin*, n=4.

Apêndice I Análise de variância dos parâmetros de viscosidade de pasta: *Vfinal*, *QV* e *TR* para os extrudados de diferentes genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Resposta	Fonte	SQ	GL	QM	F	Valor P
Vfinal	Genótipo	128376,60	5	25675,32	63,88	< 0,0001
	% Açúcar	29254,69	1	29254,69	72,79	< 0,0001
	Genótipo*% Açúcar	91741,44	5	18348,29	45,65	< 0,0001
	Resíduos	14468,75	36	401,91		
	Total	263841,48	47			
QV	Genótipo	19581,60	5	3916,32	93,02	< 0,0001
	% Açúcar	204,19	1	204,19	4,85	0,034
	Genótipo*% Açúcar	873,94	5	174,79	4,15	0,004
	Resíduos	1515,75	36	42,10		
	Total	22175,48	47			
TR	Genótipo	34656,19	5	6931,24	9,85	< 0,0001
	% Açúcar	5146,02	1	5146,02	14,53	< 0,0001
	Genótipo*% Açúcar	14788,35	5	2957,67	10,07	< 0,0001
	Residuos	5260,75	36	146,13		
	Total	59851,31	47			

Vfinal: viscosidade final (cP); QV: quebra da viscosidade (cP); TR: tendência a retrogradação (cP); SM: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; Valor P: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5,0%; Para *Vfinal*, *QV* e *TR*, n=4.

Apêndice J Análise de variância dos parâmetros de propriedades mecânicas: Nsr, Fsr, Fc e Wc para os extrudados de diferentes genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Resposta	Fonte	SQ	GL	QM	F	Valor P
Nsr	Genótipo	203,61	5	40,72	6,73	< 0,0001
	% Açúcar	86,71	1	86,71	14,34	0,0002
	Genótipo*% Açúcar	159,35	5	31,87	5,27	0,0001
	Residuos	1814,06	300	6,05		
	Total	2263,73	311			
Fsr	Genótipo	1425,84	5	285,17	21,29	< 0,0001
	% Açúcar	114,88	1	114,88	8,58	0,004
	Genótipo*% Açúcar	1515,96	5	303,19	22,63	< 0,0001
	Residuos	4018,57	300	13,40		
	Total	7075,25	311			
Fc	Genótipo	452,09	5	90,42	49,45	< 0,0001
	% Açúcar	13,38	1	13,38	7,32	0,007
	Genótipo*% Açúcar	475,37	5	95,07	51,99	< 0,0001
	Residuos	548,57	300	1,83		
	Total	1489,41	311			
Wc	Genótipo	88,12	5	17,62	14,14	< 0,0001
	% Açúcar	11,22	1	11,22	9,00	0,003
	Genótipo*% Açúcar	94,55	5	18,91	15,17	< 0,0001
	Residuos	374,03	12	1,25		
	Total	567,92	23			

Nsr: frequência de rupturas (mm^{-1}); Fsr: força específica de rupturas (N); Fc: média das forças de compressão (N); Wc: trabalho de crocância (N.mm) SM: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; Valor P: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5,0%; Para Nsr em mm^{-1} , Fsr em N, Fc em N e Wc em $N.mm^{-1}$ n=26.

Apêndice K Análise de variância do teor de compostos fenólicos totais para os extrudados de diferentes genótipos de sorgo com 0% e 10% de açúcar

Resposta	Fonte	SQ	GL	QM	F	Valor P
Compostos Fenólicos Totais (mg equiv. de ac. Gálico.100g^{-1})	Genótipo	256,95	5	51,39	279,48	< 0,0001
	% Açúcar	0,00	1	0,00	0,01	0,919
	Genótipo*% Açúcar	2,59	5	0,52	2,82	0,024
	Residuos	11,03	60	0,18		
	Total	270,58	71			

SM: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor de F calculado; Valor P: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5,0%; n=6.