

UFRRJ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**

DISSERTAÇÃO

**Obtenção e caracterização de farinha extrudada de
diferentes genótipos de sorgo para o desenvolvimento de
biscoitos doces**

Jhony Willian Vargas Solórzano

2013



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

**Obtenção e caracterização de farinha extrudada de
diferentes genótipos de sorgo para o desenvolvimento de
biscoitos doces**

JHONY WILLIAN VARGAS SOLÓRZANO

Sob a Orientação do Professor Doutor
José Luis Ramírez Ascheri

e Co-orientação do Professor Doutor
Carlos Wanderlei Piler de Carvalho

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.

**Seropédica, RJ
Março de 2013**

664.7
V297o
T

Vargas Solórzano, Jhony Willian, 1973-
Obtenção e caracterização de farinha
extrudada de diferentes genótipos de sorgo
para o desenvolvimento de biscoitos doces /
Jhony Willian Vargas Solórzano. - 2013.
114 f.: il.

Orientador: José Luis Ramírez Ascheri.
Dissertação (mestrado) - Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de
Alimentos, 2013.

Bibliografia: f. 58-65.

1. Sorgo - Teses. 2. Sorgo - Genética -
Teses. 3. Farinhas como alimento - Teses.
4. Biscoitos - Teses. 5. Processo de
extrusão - Teses. 6. Tecnologia de
alimentos - Teses. I. Ramírez Ascheri, José
Luis, 1955-. II. Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro. Curso de 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

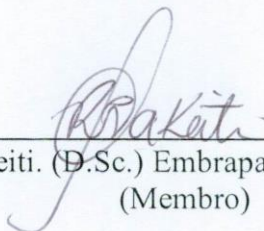
JHONY WILLIAN VARGAS SOLÓRZANO

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.

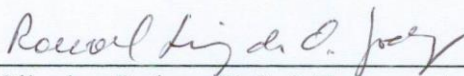
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 14/03/2013



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



Cristina Yoshie Takeiti. (D.Sc.) Embrapa Agroindústria de Alimentos
(Membro)



Ronoel Luiz de Oliveira Godoy. (D.Sc.) Embrapa Agroindústria de Alimentos
(Membro)

DEDICATORIA

Dedico esta dissertação a toda minha família, especialmente a minha mãe o grande amor da minha vida, a meu pai, por todo o amor, compreensão, confiança, amizade, força e tempo que sempre me dedicaram.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela oportunidade concedida para realizar o curso.

À Embrapa Agroindústria de Alimentos, pelas instalações cedidas para a execução completa do presente estudo.

Ao programa “Ford Foundation International Fellowships Program” pela concessão de bolsa de estudo.

Aos professores pesquisadores D.Sc. José Luis Ramirez Ascheri e Ph.D. Carlos Wanderlei Piler de Carvalho, pela condução do estudo nas diversas etapas, por todo seu apoio, encorajamento, amizade, e pelo conhecimento transmitido cada dia.

Às pesquisadoras D.Sc. Cristina Takeiti e D.Sc. Melícia Cíntia Galdeano, pelas sugestões, correções e conhecimento transmitido ao longo do estudo.

Ao professor pesquisador D.Sc. Ronoel Luiz de Oliveira Godoy e doutoranda Ana Cristina Miranda Senna Gouvêa, pela colaboração na determinação de antocianinas no laboratório de cromatografia líquida da Embrapa Agroindústria de Alimentos.

Ao técnico da Embrapa Agroindústria de Alimentos, Francisco Carlos de Oliveira, por sua amizade, conhecimento e colaboração na produção de biscoitos.

Às analistas do laboratório de moagem e reologia e planta piloto de extrusão da Embrapa Agroindústria de Alimentos, Adriana Paula da Silva Minguita e Mariana Da Costa Mattos, por sua amizade, conhecimento, treinamento no uso dos equipamentos e colaboração na produção e caracterização físico-química dos extrudados.

RESUMO

VARGAS-SOLÓRZANO, Jhony Willian. **Obtenção e caracterização de farinha extrudada de diferentes genótipos de sorgo para o desenvolvimento de biscoitos doces.** 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2013.

A diversidade dos grãos de sorgo esta relacionada com suas propriedades intrínsecas, o que inclui composição química, cor do pericarpo e compostos fenólicos, este último presente em todos os sorgos e dependente do genótipo. Esta diversidade pode ser avaliada para o desenvolvimento de novos produtos alimentícios para consumo humano e a extrusão termoplástica é considerada uma ferramenta importante para este propósito. Farinhas integrais de seis genótipos de sorgos Brasileiros de cor de pericarpo variado: branco (CMSXS180; 9010032), vermelho (BRS310; BRS308) e marrom claro (BRS305; 9929034) foram processados em um extrusor co-rotativo de dupla rosca a parâmetros de processo constante. As mudanças promovidas pelo processo de cozimento por extrusão foram avaliadas via energia mecânica específica (*EME*), pressão na placa frontal (p_f), densidade aparente (ρ), propriedades de expansão, propriedades mecânicas, propriedades de hidratação, variação da cor e propriedades de pasta. Uma correlação inversa foi observada entre p_f e ρ . Os genótipos marrons geraram baixo p e baixo índice de expansão seccional (*IES*) em comparação aos outros. O genótipo processado BRS305 apresentou a maior *EME* e valores intermédios de índices de absorção de água (*IAA*) e índice de solubilidade em água (*ISA*). O genótipo processado BRS310 alcançou os maiores valores de *IES* e *IAA*, correlacionado com alto *ISA* e valores intermédios de p_f . No genótipo processado CMSXS180 foi observado baixo *IAA*, alto *IES* e alto *ISA*, correlacionado com alta *EME* e p_f . Estes resultados refletem as diferenças na conversão do amido induzidos pelos pericarpos diferenciados entre genótipos de sorgo.

Na segunda etapa do estudo, farinhas integrais de BRS310 e BR700 (pericarpo marrom claro) foram processadas variando a frequência de rotação dos parafusos (F) entre 300–700 min^{-1} e umidades de extrusão (U) entre 14–26%, os demais parâmetros operacionais foram fixados constantes. Um delineamento central composto rotacional com dois níveis e duas variáveis foram usados para avaliar o efeito de F e U sob as variáveis dependentes de extrusão e propriedades físico-químicas dos extrudados, para os dois genótipos de sorgo selecionados. Polinômios de segunda ordem foram usados para modelar as respostas, tanto das variáveis de extrusão quanto das propriedades dos extrudados, como uma função das variáveis de processo F e U . As respostas foram mais afetadas pelas mudanças em F , em comparação com U . Valores de *EME* calculados variaram entre 596–1434 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ para BRS310 e 757–1597 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ para BR700. Valores mais altos em BR700 poderiam estar associados provavelmente com o alto teor de fibra e taninos em sua composição. As melhores farinhas extrudadas para desenvolver biscoitos foram caracterizadas por extrudados com expansão mínima, máxima densidade e leve conversão do amido. Os biscoitos processados com essas farinhas apresentaram baixa dureza. Estas propriedades desejadas correlacionaram-se com processos de baixa *EME*, os que foram obtidos combinando valores baixos de F e valores intermédios para altos, de U . O presente estudo sugere a produção de farinhas extrudadas destinado ao desenvolvimento de biscoitos, com valores de F entre 300 min^{-1} – 359 min^{-1} e valores de U entre 20% – 24,2%.

Palavras-chave: Genótipos de sorgo, extrusão, propriedades físico-químicas.

ABSTRACT

VARGAS-SOLÓRZANO, Jhony Willian. **Production and characterization of extruded flour from different sorghum genotypes for the development of sweet cookies**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2013.

The diversity of sorghum grains is related to their intrinsic properties, which include chemical composition, pericarp color and phenolic compounds, this later present in all sorghums and genotype dependent. This diversity can be valuable for developing new food products for human consumption and the thermoplastic extrusion is considered an interesting tool for this purpose. In the first stage of the experiment, whole flours of six Brazilian sorghum genotypes of varied pericarp color: white (CMSXS180; 9010032), red (BRS310; BRS308) and brown (BRS305; 9929034) were processed in a co-rotating twin-screw extruder at constant parameters process. Changes promoted by extrusion cooking were evaluated via specific mechanical energy (SME), die pressure (p), apparent density, expansion properties, mechanical properties, hydrothermal properties and color variation. An inverse relationship was observed between p and apparent density. Brown genotypes generated lower p and sectional expansion index (SEI) values than others. BRS305 processing presented the highest SME value and intermediate values of water absorption index (WAI) and water solubility index (WSI). BRS310 genotype achieved the highest SEI and WAI values, correlated with high WSI and intermediate p . In CMSXS180 processing was observed low WAI, high SEI and high WSI, correlated with high SME and p . These results reflect the differences in starch conversion induced by differentiated pericarps between sorghum genotypes.

In the second stage of the experiment, whole flours of BRS310 and BR700 were processed at 300–700 min^{-1} screw speed (SS) and 14–26% feed moisture content (MC), with the other parameters fixed constant. Response surface methodology (RSM) was used to analyze the effect of SS and MC on physicochemical properties of two genotype sorghum extrudates. A two-level, two-variable, central composite rotatable design of experiments was used. Second order polynomials were used to model the extruder response and extrudate properties as a function of process variables. Responses were most affected by changes in SS and to a lesser extent by MC. Calculated SME values ranged between 596–1434 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ for BRS310 and 757–1597 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ for BR700. The high values in BR700 most likely due to high fiber and tannin content in their composition. The best extruded flours to develop cookies are characterized by minimum expansion, maximum density, low degree of gelatinization, high WSI and low cookie hardness. This set of functional properties corresponds to processes with low SME input, which were obtained at combinations of processing parameters with low SS and intermediate to high MC. It suggest the production of extruded flours at 300 min^{-1} SS and 20% MC or 359 min^{-1} SS and 24,2% MC.

Keywords: Sorghum genotypes, extrusion, physicochemical properties.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Formulação básica para o preparo de biscoitos.	29
Tabela 2. Valores reais utilizados no DCCR para produção de extrudados.	32
Tabela 3. Matriz do DCCR com valores codificados e reais por ensaio experimental.	32
Tabela 4. Composição química aproximada, fibra detergente neutro, fitatos e taninos condensados de farinhas integrais de sorgo.	35
Tabela 5. Composição em minerais de farinhas integrais de sorgo.	38
Tabela 6. Composição em aminoácidos de farinhas integrais de sorgo.	40
Tabela 7. Resultados da análise de regressão para as variáveis dependentes de extrusão, calculado sob os níveis codificados.	49
Tabela 8. Resultados da análise de regressão para a densidade aparente e propriedades de expansão, calculado sob os níveis codificados.	51
Tabela 9. Resultados da análise de regressão para as propriedades mecânicas dos produtos, calculado sob os níveis codificados.	52
Tabela 10. Resultados da análise de regressão para as propriedades de hidratação e diferença total de cor, calculado sob os níveis codificados.	53
Tabela 11. Resultados da análise de regressão para as propriedades de pasta, calculado sob os níveis codificados.	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de um grão de sorgo. A.A.: Área apical; E.: Escutelo; E.E.: Eixo embrionário (EARP et al., 2004b).	4
Figura 2. Representação esquemática do: (a) grânulo de amido; (b) estrutura microcristalina-amorfa da amilose (LAI e KOKINI, 1991); (c) estrutura semicristalina da amilopectina (PÉREZ e BERTOFT, 2010).	6
Figura 3. Termograma DSC de amido de sorgo nativo, cultivar vermelho (OLAYINKA et al., 2011).	7
Figura 4. Curva de viscosidade de pasta de um amido nativo, com agitação constante e perfil de temperatura de aquecimento-resfriamento. V_{ini} , viscosidade inicial; V_{max} , viscosidade máxima; V_{min} , viscosidade mínima; V_{fin} , viscosidade final; QV , quebra da viscosidade; TR , tendência à retrogradação.....	8
Figura 5. Corpos proteicos de kafirinas (K) agrupados na matriz proteica da rede de glutelinas (G) e entrelaçados com grânulos de amido (A) (DE MESA-STONESTREET et al., 2010).....	9
Figura 6. Esquema generalizado dos compostos fenólicos divididos em 10 classes diferentes.	11
Figura 7. (a) Estrutura básica dos flavonoides. (b) Estrutura do cátion flavilium.	12
Figura 8. Esquema do extrusor de duplo parafuso Clextral Evolum HT25: (a) vista frontal, (b) vista lateral esquerda. (1) módulo de alimentação GG1, (2) até (10), módulos fechados FER.	15
Figura 9. Grãos integrais de genótipos de sorgo. (a) CMSXS180, (b) 9010032, (c) BRS310, (d) BRS308, (e) BRS305, (f) 9929034.	18
Figura 10. Vista superior em secção transversal do conjunto da placa frontal (matriz) do extrusor Clextral Evolum HT25: (a) cilindro; (b) placa central coletora; (c) placa distribuidora; (d) placa porta-insertos; e (e) furo do inserto. Dimensões em mm.	21
Figura 11. Representação esquemática da configuração de parafusos por cada zona de temperatura: (GG1) modulo de alimentação; (FER) módulos fechados; (C1F/C2F) parafuso de transporte de passo simples/duplo; (INO0) parafuso de interfase para a transição entre parafusos de passo simples e duplo; e (C1FC) parafuso reverso de passo simples, entalhado.....	24
Figura 12. Curva de forças de compressão de um extrudado. N_0 , número total de picos; d , distancia de compressão do produto (mm); ΔF , força de queda aplicada, por pico (N); A , área sob a curva de forças que provocou a deformação (mm ²).	26
Figura 13. Curva de viscosidade de pasta de uma farinha extrudada, com agitação constante e perfil de temperatura de aquecimento-resfriamento. V_{max} , viscosidade máxima; V_{min} , viscosidade mínima; V_{fin} , viscosidade final; QV , quebra da viscosidade; TR , tendência à retrogradação.....	28
Figura 16. Forma de madeira utilizada para moldagem dos biscoitos. Dimensões em mm.	29

Figura 17.	Curva de forças de compressão de um biscoito. F_{max} , dureza (N).....	30
Figura 14.	Delineamento composto central rotacional com duas variáveis independentes (X_i) e dois níveis (2^2). Valores reais: a_i, b_i, c_i, d_i, e_i ; Valores codificados: $\pm 1, 0, \pm\alpha$	31
Figura 15.	Distribuição de ensaios experimentais em um DCCR 2^2 . Ensaios: 1–4: pontos fatoriais; 5–8: pontos axiais; 9: ponto central.	33
Figura 18.	Cortes seccional e longitudinal de grãos de sorgo, genótipos: (a) CMSXS180; (b) 9010032; (c) BRS310; (d) BRS308; (e) BRS305; (f) 9929034; (g) BR700.....	34
Figura 19.	(a) Perfil de antocianinas do sorgo BRS310: (1) 5-metoxiapigeninidina; (2) apigeninidina; (3) 5,7-dimetoxiapigeninidina; (b) Estrutura química das antocianidinas do sorgo.	36
Figura 20.	Distribuição do tamanho de partículas de farinhas de sorgo integral: (□) CMSXS180; (▣) 9010032; (▢) BRS310; (▤) BRS308; (▥) BRS305; (▦) 9929034. Colunas construídas com dados do Anexo B ; colunas com letras de script diferentes, dentro de uma abertura de malha igual, diferem umas das outras de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).....	41
Figura 21.	Estrutura do pericarpo de genótipos de sorgo na mesma ampliação (1500x), (a) CMSXS180, (b) 9010032, (c) BRS310, (d) BRS308, (e) BRS305 e (f) 9929034.	42
Figura 22.	Efeito do genótipo de sorgo sobre a energia mecânica específica: (□) CMSXS180; (▣) 9010032; (▢) BRS310; (▤) BRS308; (▥) BRS305; (▦) 9929034. Colunas construídas com dados do Anexo C ; colunas com letras de script diferentes diferem umas das outras de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).....	43
Figura 23.	Efeito do genótipo de sorgo sob a pressão na placa frontal: (□) CMSXS180; (▣) 9010032; (▢) BRS310; (▤) BRS308; (▥) BRS305; (▦) 9929034. Colunas construídas com dados do Anexo C ; colunas com letras de script diferentes diferem umas das outras de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).....	45
Figura 24.	Efeito do genótipo de sorgo sob o índice de expansão seccional e densidade aparente dos extrudados: (□) CMSXS180; (▣) 9010032; (▢) BRS310; (▤) BRS308; (▥) BRS305; (▦) 9929034. Colunas construídas com dados do Anexo C ; colunas com letras de script diferentes diferem umas das outras de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).....	47
Figura 25.	Efeito do genótipo de sorgo sob as propriedades de hidratação dos extrudados: (□) CMSXS180; (▣) 9010032; (▢) BRS310; (▤) BRS308; (▥) BRS305; (▦) 9929034. Colunas construídas com dados do Anexo C ; colunas com letras de script diferentes diferem umas das outras de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo geral	2
1.2	Objetivos específicos	2
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1	Sorgo.....	3
2.1.1	Estrutura do grão.....	3
2.1.2	Características genóticas do pericarpo	4
2.1.3	Composição química.....	5
2.1.3.1	Amido.....	5
2.1.3.2	Proteínas	9
2.1.3.3	Lipídeos	10
2.1.3.4	Fenólicos	11
2.1.3.5	Taninos condensados	12
2.1.3.6	Antocianinas	13
2.2	Extrusão termoplástica de alimentos	13
2.3	Biscoitos.....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1	Local de execução	17
3.2	Material	17
3.2.1	Sorgo	17
3.2.2	Insumos	17
3.3	Métodos.....	17
3.3.1	Caracterização química	19
3.3.1.1	Composição centesimal, fibra detergente neutro e fitatos	19
3.3.1.2	Taninos condensados	19
3.3.1.3	Perfil de antocianinas	19
3.3.1.4	Composição em minerais	20
3.3.1.5	Composição em aminoácidos	20
3.3.2	Produção de farinhas cruas.....	20
3.3.2.1	Umidade	20
3.3.2.2	Distribuição granulométrica	21
3.3.3	Produção de extrudados	21
3.3.3.1	Taxa de fluxo mássico.....	22
3.3.3.2	Variáveis dependentes de extrusão	22

3.3.3.3 Efeito do genótipo de sorgo.....	23
3.3.3.4 Efeito da rotação dos parafusos e umidade de extrusão.....	23
3.3.4 Propriedades de expansão e densidade aparente	25
3.3.5 Propriedades mecânicas dos extrudados	25
3.3.6 Propriedades de hidratação.....	27
3.3.7 Propriedades de pasta.....	27
3.3.8 Diferença total de cor.....	28
3.3.9 Produção de biscoitos.....	29
3.3.10 Propriedades mecânicas dos biscoitos.....	30
3.3.11 Delineamento experimental para o efeito do genótipo de sorgo.....	30
3.3.12 Análise estatística para o efeito do genótipo de sorgo	30
3.3.13 Delineamento experimental para o efeito da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão	31
3.3.14 Análise estatística para o efeito da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Caracterização da matéria prima	34
4.2 Distribuição do tamanho de partícula	41
4.3 Efeito do genótipo de sorgo sob as variáveis dependentes de extrusão	43
4.3.1 Energia mecânica específica.....	43
4.3.2 Pressão na placa frontal.....	45
4.4 Efeito do genótipo de sorgo sob as propriedades físico-químicas dos extrudados	46
4.4.1 Densidade aparente e índice de expansão seccional	46
4.4.2 Propriedades de hidratação.....	47
4.5 Efeito dos parâmetros operacionais sob as variáveis dependentes de extrusão	49
4.6 Efeito dos parâmetros operacionais sob as propriedades físico-químicas de extrudados de dois genótipos de sorgo	50
4.6.1 Densidade aparente e propriedades de expansão.....	50
4.6.2 Propriedades mecânicas dos extrudados	51
4.6.3 Propriedades de hidratação e diferença total de cor	52
4.6.4 Propriedades de pasta.....	53
4.6.5 Propriedades mecânicas dos biscoitos	54
5 CONCLUSÕES	55
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS	66

1 INTRODUÇÃO

A produção de sorgo no Brasil é consideravelmente elevada, chegando alcançar 1,93 milhões de T.M. em 2011 (FAOSTAT, 2013). Embora a produção deste grão seja alta, não é incluído na dieta dos Brasileiros, sendo usado apenas para forragem animal. Acredita-se que o sorgo não é consumido por motivos sensoriais (VÁZQUEZ-ARAUJO et al., 2012). Por sua vez, o consumo de sorgo integral na modalidade de farinha pode apresentar benefícios para a saúde devido seu alto teor de fibras e compostos fenólicos tais como ácidos fenólicos, flavonoides e taninos condensados, os quais têm sido considerados recentemente como compostos bioativos de ação saudável (AWIKA e ROONEY, 2004; DYKES e ROONEY, 2006).

Em anos recentes, o sorgo foi estudado para consumo humano usando principalmente processos térmicos (AL-RABADI et al., 2011a; AL-RABADI et al., 2011b; MAHASUKHONTHACHAT et al., 2010; MEERA, et al., 2011; MÉNDEZ-ALBORES et al., 2009; MORAES et al., 2012; WU, et al., 2012) em comparação a processos não térmicos (MUKISA et al., 2012).

O cozimento por extrusão é um processo contínuo de um único estágio que combina forças de cisalhamento, altas pressões e altas temperaturas em curto tempo (BERK, 2009). O material alimentício é plastificado com água a fim de alcançar fluidez e ser cozido continuamente enquanto atravessa o canhão cilíndrico (BERRIOS, et al., 2013). Todo material granular perde sua estrutura nativa e organizada, e forma-se uma massa visco-elástica contínua. Estas transições de ordem/desordem estrutural resultam em modificações do tamanho, forma e reatividade dos biopolímeros. Assim, simultaneamente o amido é gelatinizado/degradado, com formação de complexos entre lipídeos e amilose, e os corpos proteicos são degradados/desnaturalizados, com material fibroso associado a través de ligações intra e inter moleculares, o que repercute nas propriedades físico-químicas do extrudado (DE MESA-STONESTREET, 2012; LAI e KOKINI, 1991).

As alterações destas propriedades são controladas pela introdução de energia ao sistema de extrusão. A energia mecânica específica (EME) é a quantidade de calor gerado durante a extrusão. O calor é dissipado no produto em fluxo. Por meio da fricção, o consumo de potencia do motor usado para girar o eixo do parafuso é transmitido ao material de alimentação (BERK, 2009). Os valores de EME estão relacionados com a viscosidade da massa fundida na placa frontal do extrusor, teor de amilose, despolimerização da amilopectina e com o desgaste dos parafusos e o canhão (AL-RABADI et al., 2011a; ALTAN et al., 2009; MILADINOV e HANNA, 2000, ROBIN et al., 2011).

As propriedades físico-químicas dos extrudados são usadas para desenhar produtos com características específicas em uma indústria em particular. Estas propriedades são influenciadas por parâmetros intrínsecos das matérias-primas tais como o tipo de amido, presença de compostos não amiláceos (proteínas, fibras e lipídeos) e o tamanho das partículas. Por sua vez, a máquina de extrusão influi nos parâmetros operacionais tais como a taxa de alimentação de sólidos, taxa de adição de água, perfil de temperaturas das zonas modulares, configuração do parafuso e frequência de rotação do parafuso. A alteração de uma ou mais destas variáveis independentes pode alterar uma ou mais variáveis dependentes de extrusão tais como a EME, pressão e temperatura da massa fundida, e em consequência são afetadas as propriedades físico-químicas do extrudado (AL-RABADI et al., 2011a).

As propriedades de expansão da massa fundida estão relacionadas com o grau de porosidade do extrudado, o que afeta as propriedades mecânicas e de transporte tais como a

taxa de cisalhamento e a difusão de aromas (WŁODARCZYK-STASIAK e JAMROZ, 2009). As propriedades de hidratação desempenham um papel importante nas interações proteína-água e carboidrato-água. Estão relacionadas com o grau de alteração molecular dos biopolímeros: despolimerização/formação de novos complexos macromoleculares (DOGAN e KARWE, 2003).

Estudos prévios com relação à extrusão do sorgo foram conduzidos usando farinhas de grãos decorticados de genótipos de baixo tanino e processados com extrusores de parafuso simples (FAPOJUWO et al., 1987; FALCONE et al., 1988; ANDERSON e JONES, 1999). Alguns estudos relacionados às propriedades físico-químicas de extrudados de sorgo, processados com composição diferente de matérias primas foram conduzidos variando quantidades de amilose a partir da mistura de grãos cerosos e não-cerosos (GOMEZ et al., 1988), teor de taninos alto e baixo (YOUSSEF et al., 1990) e frações de tamanho de partícula (AL-RABADI et al., 2011a).

O pericarpo dos grãos de sorgo varia em cor, grossura, presença de uma testa pigmentada e metabólitos secundários coloridos, o que afetam a composição fenólica (DYKES, et al., 2009). Os compostos fenólicos podem estar presentes tanto na forma solúvel, livres ou esterificadas, como na forma insolúvel ligado aos constituintes da parede celular tais como carboidratos, proteínas e fibras (ARRANZ e CALIXTO, 2010). Este arranjo natural nos genótipos de sorgo poderia influenciar na fusão de polímeros cristalinos ou na transição vítrea de polímeros amorfos e conseqüentemente sob as propriedades funcionais dos produtos extrudados. Este estudo foi conduzido visando os seguintes objetivos:

1.1 Objetivo geral

Produzir e avaliar as propriedades físico-químicas de extrudados de genótipos de sorgo e desenvolver biscoitos doces usando farinhas extrudadas.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a composição centesimal, composição em minerais, perfil de aminoácidos, fibra insolúvel, fitatos, taninos condensados,
- Produzir extrudados a partir de seis genótipos de sorgo integral, em condições operacionais constantes de extrusão termoplástica;
- Avaliar o efeito do genótipo sob as variáveis dependentes de extrusão e propriedades físico-químicas;
- Produzir extrudados a partir de dois genótipos de sorgo integral; de baixo e alto teor de taninos, variando a frequência de rotação dos parafusos e a umidade de extrusão;
- Avaliar o efeito da frequência de rotação dos parafusos e a umidade de extrusão sob as variáveis dependentes de extrusão e propriedades físico-químicas;
- Produzir biscoitos doces usando farinhas extrudadas de sorgo e avaliar as propriedades mecânicas dos biscoitos obtidos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sorgo

Os grãos integrais são componentes importantes na dieta humana, os quais aportam fito-químicos únicos que complementam aos das frutas e vegetais quando são consumidos juntos. O trigo, arroz e milho são os principais grãos da dieta humana. Os grãos menores incluem à aveia, cevada, centeio, triticale, sorgo, painço e o trigo sarraceno (LIU, 2007).

O sorgo é um cereal nativo de África e Ásia, usada como fonte de proteínas na alimentação humana nas regiões sub-Sahara africana e sul-asiática. O uso como forragem animal dá-se principalmente em América do Norte (MORRIS e BRYCE, 2000).

A produção mundial de sorgo é cerca de 55,7 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2013) e ocupa o quinto lugar, depois do milho, arroz, trigo e cevada (DLAMINI et al., 2007), sendo os produtores primários Nigéria, Índia e Estados Unidos e os consumidores principais Nigéria, México e Índia. Estados Unidos é o maior exportador, México e Japão são os maiores importadores (USDA, 2006).

O sorgo é uma cultura marginal ao milho, com um preço 20% menor, com custos de produção semelhantes e com a vantagem de ser um pouco mais tolerante, mas não resistente à falta de chuva do que o milho (EMBRAPA, 2011).

A produção de sorgo no Brasil alcançou 1,93 milhões de T.M. em 2011 (FAOSTAT, 2013) em aproximadamente 0,5 milhões de hectares com um rendimento meio de 2.031 kg/há, destinado para forragem animal, das quais 50 mil T.M se chegou exportar em 2006 (USDA, 2006). A produção de sorgo no Brasil apenas é realizada quando o produtor já possui o destino acertado da sua colheita, isto é, o produtor planta sorgo para consumo no seu estabelecimento, ou tem contrato de entrega para alguma processadora de alimento animal (EMBRAPA, 2011).

No Brasil não se tem hábito de consumir sorgo como alimento humano, existindo algumas tentativas de consumo principalmente na região Nordeste. O consumo de sorgo exige mudança de hábitos que estão arraigados nos consumidores, e devido ao desconhecimento do seu valor nutritivo, são considerados de baixa qualidade aqueles produtos formulados com sorgo. Não obstante, as qualidades nutricionais do sorgo são semelhantes às do milho (EMBRAPA, 2011), sem tomar em consideração seus compostos fenólicos.

2.1.1 Estrutura do grão

Os grãos integrais estão compostos do endosperma (81–84%), germe (embrião e escutelo, 8–12%) e farelo, esta última inclui: o pericarpo (7–9%), uma testa pigmentada (sua presença/ausência é dependente do genótipo) e a camada de aleurona (**Figura 1**). O pericarpo do grão de sorgo esta constituído de três camadas: epicarpo, mesocarpo e endocarpo.

O epicarpo consiste de duas camadas: epidermes e hipodermes. A primeira camada compõe-se de células retangulares de parede grossa e é revestido externamente de uma camada cuticular. A hipodermes se encontra debaixo da epidermes e consiste de 1 a 3 camadas grossas de células compactas (MOHARRAM e YOUSSEF, 1995). O mesocarpo geralmente esta composto de 5–6 camadas de células, sendo não incomum encontrar mesocarpos com 10–14 camadas de células (EARP et al., 2004b).

O endocarpo consiste de células cruzadas e células tubulares, facilmente quebráveis (MOHARRAM e YOUSSEF, 1995).

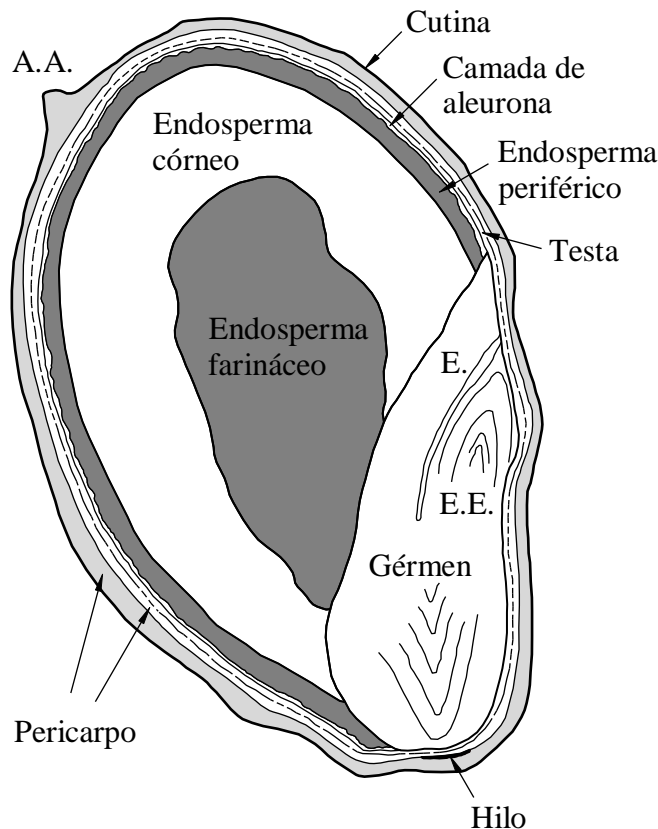


Figura 1. Esquema de um grão de sorgo. A.A.: Área apical; E.: Escutelo; E.E.: Eixo embrionário (EARP et al., 2004b).

O eixo cumprido das células cruzadas está disposto perpendicularmente com relação ao eixo cumprido do grão, enquanto as células tubulares estão arranjadas paralelamente ao eixo cumprido do grão (EARP et al., 2004b). Geralmente a grossura do pericarpo varia de 8–16 mm entre genótipos de sorgo. A testa pigmentada encontra-se entre o pericarpo e a camada de aleurona. Esta última está associada intimamente ao endosperma e consiste de células incolores de estrutura esférica de diferente tamanho (MOHARRAM e YOUSSEF, 1995).

O endosperma consiste de três zonas: periférico, córneo e farináceo. O endosperma periférico inicia-se desde o final da camada de aleurona e estende-se até 2 a 6 células endospermicas grossas. O endosperma córneo consiste de uma camada entrelaçada de amido e proteína. O endosperma farináceo se localiza na zona central do grão. O germe está firmemente embebido no grão e é composto do eixo embrionário (EE) e o escutelo (E).

2.1.2 Características genóticas do pericarpo

Os grãos de sorgo estão presentes em uma ampla variedade de cores (branco, amarelo-limão, vermelho e preto), formas e tamanhos. A cor do pericarpo é controlada pelos genes *R* e *Y*. O sorgo de pericarpo branco tem genes *Y* recessivos (*R_{yy}* ou *rryy*), enquanto o sorgo de pericarpo vermelho ou preto tem ambos os genes *R* e *Y* (*R_Y*). O sorgo preto é um sorgo vermelho especial que se torna preto quando exposto aos raios solares e tem altos níveis de 3-deoxiantocianidinas, localizados no pericarpo (AWIKA et al., 2004; DYKES et al., 2009).

O sorgo amarelo-limão tem genes recessivo *R* e dominante *Y* (*rrY_*). Os sorgos de pericarpo branco, espessura fina e endosperma amarelo são identificados frequentemente como sorgo amarelo-limão devido sua aparência. Mas, estes sorgos não são geneticamente amarelos-limão, existindo muita confusão. O sorgo amarelo-limão tem pericarpo amarelo brilhante quando alcança a maturidade. Uma vez exposto ao ambiente, o grão se torna marrom claro (DYKES et al., 2011).

Os genes *B₁B₂* controlam a presença de uma testa pigmentada (*B₁b₂b₂* ou *b₁b₁B₂* ausência de testa pigmentada). Todos os sorgos que apresentam testa pigmentada contêm taninos condensados (DYKES et al., 2009). Os grãos sem testa são classificados como tipo I, eles não apresentam níveis significativos de taninos. Se a extração dos taninos depende ou não de reações catalisadas por ácidos se terá grãos de sorgo tipo II ou tipo III, respectivamente. Os taninos do sorgo tipo II estão depositados em vesículas, cujas membranas formam uma barreira protetora, requerendo um meio ácido para ultrapassar. Em contraste, os taninos do sorgo tipo III estão depositados livremente ao longo das paredes celulares (EARP et al., 2004b).

O gene *Z* controla a grossura do pericarpo (*ZZ* = fino; *zz* = grosso) e não afeta os níveis de flavonoides (DYKES et al., 2009). Os metabolitos secundários coloridos são controlados pelos genes *P* e *Q* para produzir pigmentos canela *ppqq* ou *ppQQ*, vermelho (*PPqq*) e roxo (*PPQQ*). Estes compostos coloridos afetam a aparência das folhas, talos, bainhas e glumas (DYKES et al., 2011).

2.1.3 Composição química

A camada cuticular contém depósitos superficiais de cera e a epidermes frequentemente contém material pigmentado (EARP et al., 2004b). O pericarpo é constituído especialmente por lignina e celulose (PEYRON et al., 2002b) e apenas os grãos de pericarpo grosso contêm grânulos de amido no mesocarpo (DYKES e ROONEY, 2006). A testa pigmentada esta constituída por taninos condensados (DYKES et al., 2009) e a camada de aleurona contém proteínas, minerais, vitaminas solúveis em água e enzimas lipolíticas (MOARRAM e YOUSSEF, 1995; MEERA et al., 2011).

O endosperma periférico é rico em corpos proteicos, com alguns grânulos de amido pequenos embebidos na densa matriz proteínica. O endosperma córneo consiste de grânulos de amido poligonais, fortemente rodeado por corpos proteicos e o endosperma farináceo, de grânulos de amido angulares rodeados por uma folha fina de corpos proteicos (MOHARRAM e YOUSSEF, 1995; PEYRON et al., 2002b). As células do escutelo contêm lipídeos e corpos proteicos em união com alguns grânulos de amido (MOHARRAM e YOUSSEF, 1995). O germe também possui enzimas lipolíticas (MEERA et al., 2011) e ácido fítico (DUODU et al., 2003).

2.1.3.1 Amido

O amido é um polímero semicristalino, biosintetizado como grânulos em plantas superiores e geralmente consiste de dois tipos de polímeros de α -D-glicose: amilose e amilopectina, com conteúdo variável de 1–2% de lipídeos, proteínas e minerais. A amilose é uma mistura de moléculas lineares e ligeiramente ramificadas com um peso molecular (PM) de aproximadamente $1 \times 10^5 - 1 \times 10^6 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, enquanto a amilopectina é uma molécula muito maior com um PM de $1 \times 10^7 - 1 \times 10^9 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, de estrutura altamente ramificada constituída por cerca de 95% de ligações α -1,4 e 5% de ligações α -1,6 (CAI et al., 2010). Os polímeros dentro do grânulo estão dispostos de modo radial formando camadas alternadas de regiões semicristalinas e amorfas ao redor do hilum (**Figura 2a**) (BeMILLER e HUBER, 2008).

As cadeias de amilose com um grau de polimerização (GP) maior a 10 encontram-se arranjadas em hélices duplas. Estas cadeias ordenam-se paralelamente e formam regiões microcristalinas. As regiões amorfas estão constituídas por segmentos de amilose de cadeias flexíveis, as quais estão unidas covalentemente por ligações cruzadas com as regiões microcristalinas (**Figura 2b**) (LAI e KOKINI, 1991). As ramificações de amilopectina com $GP \geq 6$ apresentam-se como duplas hélices empacotadas, formando pequenas lamelas cristalinas de 5–6 nm, e constituem as camadas mais densas do grânulo de amido em comparação com as camadas amorfas de 3–4 nm, menos densas (**Figura 2c**) (PÉREZ e BERTOFT, 2010).

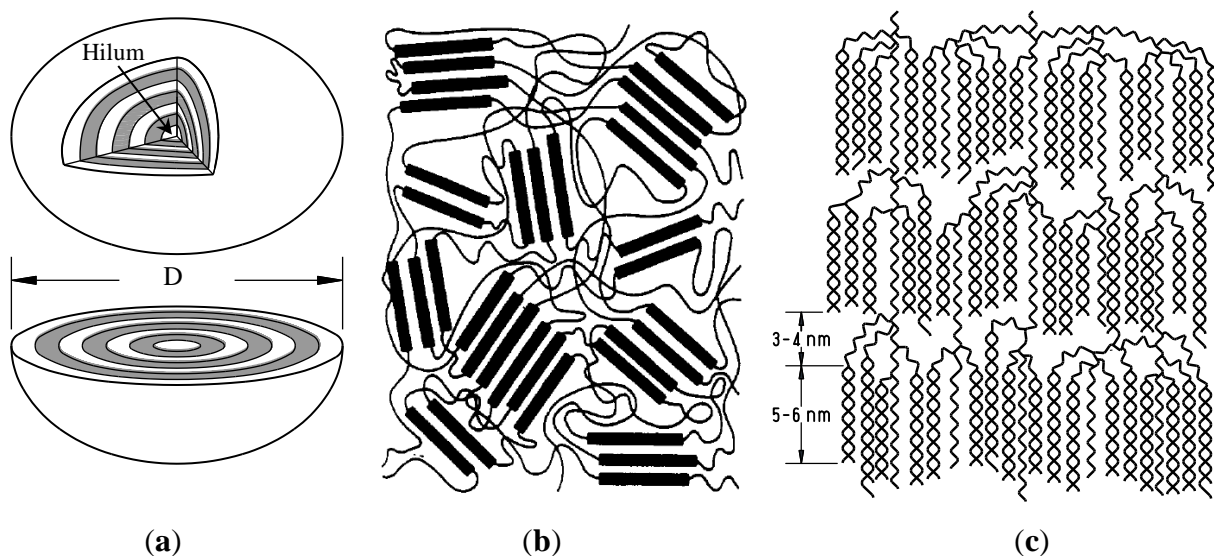


Figura 2. Representação esquemática do: (a) grânulo de amido; (b) estrutura microcristalina-amorfa da amilose (LAI e KOKINI, 1991); (c) estrutura semicristalina da amilopectina (PÉREZ e BERTOFT, 2010).

A biosíntese é iniciada no hilum e os grânulos crescem por justaposição, ocorrendo em múltiplas formas e tamanhos (esféricas, ovais, poligonais, lenticulares, alongadas, formas de rim, túbulos irregulares, etc). Segundo a origem botânica, o diâmetro dos grânulos (D) varia entre 1–200 μm (PÉREZ e BERTOFT, 2010).

O teor de amido nos grãos integrais de sorgo varia de 65–70%, de acordo com o genótipo, das quais o 82,5% está distribuído no endosperma, 34,6% no farelo e não mais de 13% no germe. O teor de amilose varia de 22,0 – 27,8% e possui menos lipídeos associados, em comparação ao amido do trigo (1,66%) (CARCEA et al., 1992). O teor de amilopectina varia de 70–80% em variedades de sorgo não cerosas, sendo a razão amilopectina/amilose por volta de 3:1 (MOHARRAM e YOUSSEF, 1995).

O teor de amido de farinhas de sorgo segregadas por tamanho varia levemente: grãos inteiros, 63,8%; partículas grossas (> 1mm): 69,7%; partículas médias (0,5 – 1 mm): 64%; partículas finas (< 0,5 mm): 63,5% (AL-RABADI et al., 2011a).

A característica morfológica dos amidos provenientes de diversas fontes de plantas varia de acordo com o genótipo, as práticas culturais, a bioquímica dos plastídios (cloroplasto e amiloplasto) e a fisiologia da planta. Os grânulos de amido de sorgo mostraram ter formas poliédricas irregulares e esféricas, com presença de poros e canais tipo tubo na superfície. O cultivar M-35 mostrou a presença de grânulos em forma de anel (SING, et al., 2010).

Adicionalmente, Singh et. al., (2011) reportou grânulos de forma alongada. Huber e BeMiller (2000) observaram que os canais radiais tipo tubo dos grânulos de amido de sorgo penetram da superfície externa para dentro em direção à cavidade até o hilum.

Entretanto, estes canais foram relatados variar em profundidade de penetração de grânulo para grânulo. Fannon, et al. (1993) mencionam que esses poros provavelmente sejam as aberturas para os canais que dão acesso ao interior dos grânulos de amido de sorgo.

Vallons e Arendt (2009), reportaram diâmetros de grânulos de amido de sorgo entre 2–30 μm , com formato poligonal no endosperma córneo (grânulos menores), enquanto no endosperma farináceo apresentaram formato arredondado (grânulos maiores). Durante o processo de gelatinização induzido por pressão ou calor, observou-se colapso dos grânulos com estruturas em forma de anel.

A estrutura parcialmente cristalina do amido cria três possíveis transições moleculares de ordem/desordem: uma transição vítrea (T_g) para o componente amorfo, uma transição de fase (T_m) para o componente cristalino, e uma transição de cristalização (T_d) para o componente completamente amorfo, mas cristalizável (LAI e KOKINI, 1991).

As alterações estruturais do amido quando absorve ou liberta calor (transição) são medidas por calorimetria diferencial de varredura (DSC). As propriedades de medição incluem a entalpia de transição térmica ou entalpia de gelatinização do amido (ΔH_{gel}) e as temperaturas de transição (**Figura 3**): temperatura de início da gelatinização (T_o), temperatura de pico endotérmico (T_p) e temperatura de cese da gelatinização (T_c). A faixa de gelatinização (R) é calculada como a diferença: $R = T_c - T_o$ (SING, et al., 2007).

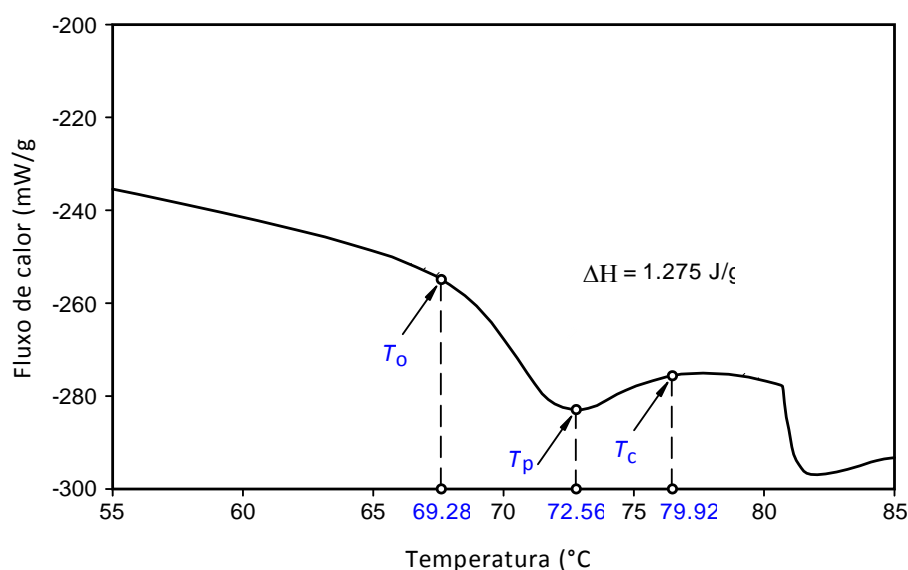


Figura 3. Termograma DSC de amido de sorgo nativo, cultivar vermelho (OLAYINKA et al., 2011).

O intervalo de temperatura de gelatinização do amido nativo de sorgo encontra-se na faixa de 68–75°C, com temperatura inicial superior aos cereais e tubérculos comuns (BOBBIO e BOBBIO, 2003). Sing, et al. (2010) separaram amido de diferentes genótipos de sorgo vermelho da Índia, os quais mostraram faixas de T_o entre 66,1–73,12°C; T_p entre 70,1–77,79°C; e T_c entre 75,0–81,24°C e ΔH_{gel} variou entre 9,26 – 13,5 J/g. Subrahmanyam e

Hoseney (1995) reportaram valores de ΔH_{gel} entre 2,84 e 3,39 J/g para sete amidos de sorgo procedentes dos Estados Unidos de América. Entre amidos de sorgo nativo, o genótipo vermelho teve valores altos de T_o (69,28°C), quando comparado com o genótipo branco (68,86°C). (ΔH_{gel} foi maior no cultivar branco (1.953 J/g) e menor no cultivar vermelho (1.275 J/g). As variações observadas nos valores de ΔH_{gel} é um reflexo da composição granular dos amidos. Valores menores de ΔH_{gel} sugerem uma menor porcentagem de arranjos organizados ou uma menor estabilidade das regiões cristalinas (OLAYINKA, et al., 2011).

As propriedades de pasta dos amidos nativos são quantificadas com um analisador rápido de viscosidade (RVA). O instrumento gera uma curva de viscosidade (**Figura 4**) e são registrados os seguintes parâmetros: viscosidade inicial (V_{ini}); viscosidade máxima (V_{max}); viscosidade mínima (V_{min}) e viscosidade final (V_{fin}). A quebra da viscosidade é calculada como: $QV = V_{max} - V_{min}$, e a tendência à retrogradação como: $TR = V_{fin} - V_{min}$.

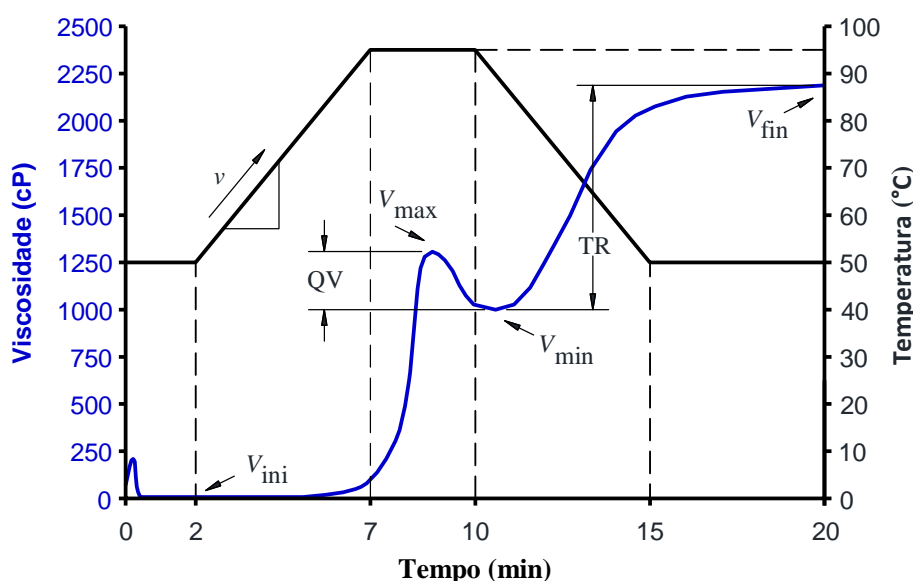


Figura 4. Curva de viscosidade de pasta de um amido nativo, com agitação constante e perfil de temperatura de aquecimento-resfriamento. V_{ini} , viscosidade inicial; V_{max} , viscosidade máxima; V_{min} , viscosidade mínima; V_{fin} , viscosidade final; QV , quebra da viscosidade; TR , tendência à retrogradação.

Diferenças na extensão de lixiviação da amilose, formação de complexos amilose-lipídeos e inchamento dos grânulos, promovem diferenças nas viscosidades de pasta. Amidos com alta cristalinidade e baixo teor de amilose possuem altos valores TR . V_{max} em uma concentração dada indica a habilidade dos grânulos para inchar livremente antes de acontecer quebra física. Diferenças genéticas dos cultivares de sorgo podem contribuir a mudanças das propriedades de pasta dos amidos. O efeito dos compostos polifenólicos é positivamente correlacionado com V_{max} . É imprescindível fazer uma determinação qualitativa de taninos para descartar ou não o efeito sobre as propriedades de pasta dos amidos (SING, et al., 2010).

O cultivar vermelho possui menores valores de temperatura de pasta (82,75°C) enquanto que o cultivar branco possui valores maiores (84,25°C). O amido nativo branco com maior poder de inchamento apresenta maior quebra e é mais solúvel. É provável que a alta temperatura de gelatinização do amido nativo de sorgo branco deve-se a sua arquitetura granular compacta (OLAYINKA, et al., 2011).

2.1.3.2 Proteínas

O grão de sorgo possui um teor proteico médio de 11% (LASZTITY, 1996). Geralmente, os genótipos de endosperma farináceo, pericarpo grosso e baixo teor de taninos são ricos em proteínas (MOHARRAM e YOUSSEF, 1995). A distribuição do nitrogênio nas partes anatômicas do grão de sorgo foi reportada aproximadamente 80% no endosperma, das quais as maiores frações são prolaminas e glutelinas. O germe contém 16% do nitrogênio do grão, muito dos quais correspondem a compostos nitrogenados de baixo peso molecular, albuminas e globulinas, estas últimas ricas em lisina e triptofano. Aproximadamente 3% do nitrogênio do grão foram encontrados no pericarpo (TAYLOR e SCHUSSLER, 1986). No grão integral, as prolaminas corresponderam a 55%, as glutelinas 20%, as albuminas 11%, as globulinas 6% e o resíduo proteico não extraível corresponderam a 6% (ALI et al., 2009).

As prolaminas do sorgo se denominam kafirinas, ricas em prolina (11 mol%) ligadas com taninos condensados e ácidos tânicos (TAYLOR et al., 2007). São categorizadas como α , β , γ (nível proteico) e δ (nível de transcrição de genes) e formam corpos proteicos rígidos (diâmetro: 0,4–2 μm) fortemente agrupados na matriz proteica da rede de glutelinas, e entrelaçados com grânulos de amido (**Figura 5**) (DE MESA-STONESTREET et al., 2010). A fração γ -kafirina (23 mol% de prolina) encontra-se mais ligada aos taninos e por tanto a fração de menor digestibilidade (TAYLOR, et al., 2007).

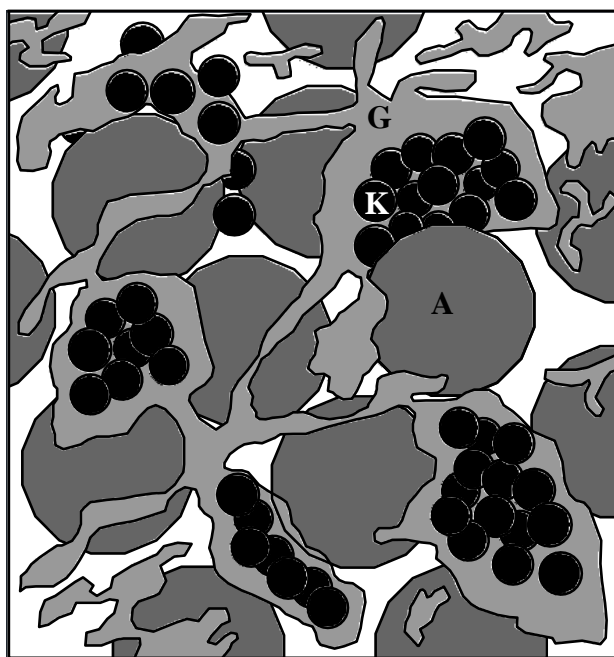


Figura 5. Corpos proteicos de kafirinas (K) agrupados na matriz proteica da rede de glutelinas (G) e entrelaçados com grânulos de amido (A) (DE MESA-STONESTREET et al., 2010).

O endosperma do sorgo dependendo se é farináceo ou vítreo, possui entre 66–84% de α -kafirina, 8–13% de β -kafirina, 9–21% de γ -kafirina e baixos níveis de δ -kafirina. A fração α -kafirina é dividida em 2 grupos de polipeptídeos com pesos moleculares de 23 e 25 kDa,

são ricas em aminoácidos apolares, encontram-se principalmente como monômeros e oligômeros, formam pontes dissulfeto intramoleculares e não formam ligações cruzadas intermoleculares. β -kafirina (~18 kDa) é rica em aminoácidos contendo enxofre (metionina e cisteína) e encontra-se em forma monomérica e polimérica. γ -kafirina (~20 kDa) é rica em aminoácidos prolina, cisteína e histidina e encontra-se como oligômeros e polímeros. β e γ -kafirina formam pontes dissulfeto inter e intramoleculares, são altamente reticuladas e encapsulam a fração α . δ -kafirina (~13 kDa) é rica em metionina. Em todas as frações esta quase ausente o aminoácido essencial lisina (BELTON, et al, 2006).

Em geral, as kafirinas do sorgo são ricas em glutamina e aminoácidos apolares prolina, leucina e alanina, sendo a ordem de hidrofobicidade: α -kafirina > β -kafirina > γ -kafirina. O teor de prolina e glutamina representam mais de 30% dos resíduos totais (BELTON, et al, 2006). Uma razão leucina/isoleucina alta (> 3:1) afeta a atividade de algumas enzimas envolvidas na conversão de triptofano para ácido nicotínico, e em consequência a proteína será deficiente em niacina. Em genótipos de alta lisina esta razão é menor (MOHARRAM e YOUSSEF, 1995).

As β e γ -kafirinas têm propriedades funcionais parecidas aos da glutenina do trigo (quando hidratada, forma uma massa elástico-coesiva muito dura) e a α -kafirina possui a funcionalidade da gliadina (quando hidratada, forma uma massa fluido-viscosa que é extensível, mas de baixa elasticidade) (SCHOBER, et al., 2011).

No estado cru, as kafirinas têm alguma tendência hidrofílica, enquanto o cozimento em alta umidade enfatiza sua hidrofobicidade. O efeito de inversão de absorção da água após o cozimento pode ser devido às extensas ligações de pontes dissulfeto, o que resulta na polimerização de monómeros de kafirinas e no realinhamento das kafirinas em conformação β -folha. Esta mudança na estrutura secundária impede a absorção de água e reduz a susceptibilidade à proteólise (CORREIA, et al., 2010). A cocção com alta umidade do sorgo mostrou uma diminuição do conteúdo de albuminas, globulinas e kafirinas, um aumento concomitante de glutelinas e proteínas não extratáveis (ALI, et al., 2009) e, um aumento do teor de proteínas indigeríveis à pepsina por causa da polimerização de proteínas (CORREIA, et al., 2010).

O cozimento com baixo teor de água melhora a digestibilidade das proteínas do sorgo, como ocorre nos processos de cozimento por explosão e cozimento por extrusão. Este fenômeno é atribuído à fragmentação das paredes celulares do endosperma vítreo e consequente expansão do amido, expondo às proteínas ao ataque de enzimas no trato digestivo (CORREIA, et al., 2010, DE MESA-STONESTREET et al., 2012).

2.1.3.3 Lipídeos

O teor de gordura (3–4%) do grão de sorgo não é afetado por o tipo de amido (normal ou ceroso). Entre as partes anatômicas, o pericarpo e o germe contêm as principais porções de material lipídico: 3,7–6% no farelo, 19–30,6% no germe e, 0,2–0,8 % no endosperma (MEERA et al., 2011; MOHARRAM e YOUSSEF, 1995). Os lipídeos encontram-se livres (2,6–3,3%) ou ligados (0,14 –0,38%). Perto de 90% são lipídeos neutros, 6% glicolipídeos e 4% fosfolipídeos.

Os lipídeos ocorrem como complexos de inclusão dentro das hélices de polissacarídeos, e também na superfície e dentro dos capilares entre grânulos de amido (BeMILLER e HUBER, 2008).

2.1.3.4 Fenólicos

Os compostos fenólicos ou polifenóis constituem um dos grupos de substâncias mais numerosos e amplamente distribuídos no reino vegetal (PIETTA et al., 2003). Com base na sua estrutura química, variam amplamente, desde moléculas simples, tais como os ácidos fenólicos, até compostos altamente polimerizados, tais como os taninos. Na **Figura 6**, os fenólicos estão subdivididos em duas categorias principais: ácidos fenólicos e flavonoides.

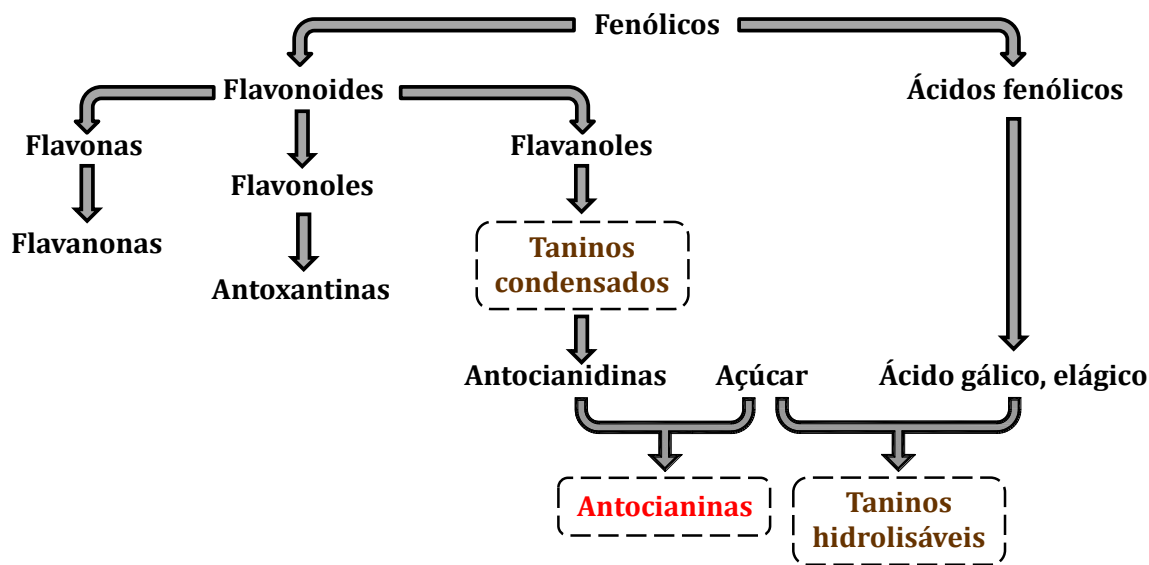


Figura 6. Esquema generalizado dos compostos fenólicos divididos em 10 classes diferentes.

Os taninos são compostos solúveis em água, derivados de ambas as categorias e são classificados como taninos condensados ou hidrolisáveis. A formação de complexos insolúveis com proteínas causa a adstringência dos alimentos ricos em taninos.

Os taninos que hidrolisam com rapidez, denominados de taninos hidrolisáveis, consistem em uma molécula de glicose ligada a moléculas de ácido gálico ou ácido elágico. O tanino hidrolisável mais comum é o ácido tânico, que consiste de uma molécula de glicose esterificado por cinco unidades de ácido gálico (BRAVO, 1998).

Os flavonoides ou 4-oxo-flavonoides incluem grupos de polifenóis complexos que compartilham uma estrutura comum de difenilpropanos ($C_6-C_3-C_6$) caracterizado por dois anéis aromáticos (A e B) e um anel heterocíclico oxigenado (C) (**Figura 7a**).

Os flavonoles são caracterizados pela presença de um grupo hidroxila na posição C_3 . Ao redor de 90% dos flavonoles possuem hidroxilas adicionais nas posições C_5 e C_7 . As flavonas diferem dos flavonoles, pela ausência do grupo hidroxila na posição 3 do anel C. As flavanonas surgem das flavonas após a redução da dupla ligação no heterociclo (posição C_2/C_3). Os flavanoles (flavan-3-ols) têm uma estrutura de anel C semelhante ao dos flavonoides, mas caracterizadas pela ausência de ligação dupla na posição C_2/C_3 , e do grupo 4-oxo (PIETTA et al., 2003).

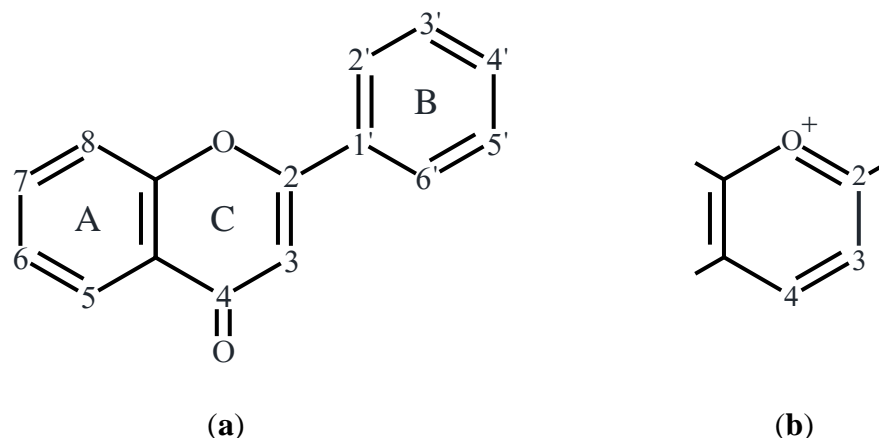


Figura 7. (a) Estrutura básica dos flavonoides. (b) Estrutura do cátion flavilium.

As antocianidinas possuem uma estrutura de cátion flavilium no anel C (**Figura 7b**). Os padrões de hidroxilação nas antocianidinas naturais encontram-se nas posições C₃, C₅ e C₇. Portanto, a maioria das antocianidinas são derivados do cloreto de 3,5,7-trihidroxiflavilium e são raramente encontrados no material vegetal fresco por causa de sua instabilidade (PIETTA et al., 2003).

2.1.3.5 Taninos condensados

A diferença dos taninos hidrolisáveis, os taninos condensados são polímeros de flavanóis que não hidrolisam prontamente. Os flavan-óis de maior ocorrência natural são: (+)-catequina e (-)-epicatequina. Os oligômeros contendo 2-4 unidades de catequina ou epicatequina são denominados procianidinas oligoméricas (PIETTA et al., 2003).

As variedades de sorgo BR (*bird resistance*) produzem grandes quantidades de taninos condensados, depositados na testa pigmentada do grão. O controle da presença de testa pigmentada é geneticamente controlada pelos genes *B₁-B₂* (DYKES et al., 2009).

Os taninos no sorgo são quase exclusivamente do tipo condensado (proantocianidinas) e são principalmente produtos polimerizados de hidroxiflavan-3-óis (catequinas) e/ou hidroxiflavan-3,4-dióis (leucoantocianidinas) de comprimento variável entre 8-10 unidades (AWIKA e ROONEY, 2004; DYKES e ROONEY, 2006). Krueger et al. (2003), reportaram polímeros glicosilados e não glicosilados de flavan-4-óis com vários padrões de substituição. Gu et al. (2002), também reportaram proantocianidinas com (+)-catequina como unidades terminais principais da cadeia (88%) e (-)-epicatequina como unidades de extensão da cadeia. A catequina é o monômero comumente mais relatado, no entanto a procianidina B₁ é o dímero mais comum presente no sorgo. A epicatequina galato também é um componente significativo das proantocianidinas de baixo peso molecular presente nos taninos do sorgo (AWIKA, 2003).

Brandon et al. (1982), reportou a presença de prodelfinidinas em sorgo e Krueger et al. (2003) observou uma grande heterogeneidade nos polímeros de polyflavan-3-ol (procianidinas) em termos de ligações interflavan (tipo A ou B) e também a presença de padrões de hidroxilação de galocatequina/epigalocatequina nos polímeros de taninos do sorgo.

O comprimento da cadeia polimérica do tanino é importante porque afeta as propriedades antioxidantes e organolépticas dos taninos (LOTITO et al., 2000). Conhecer a proporção relativa dos diferentes polímeros e oligômeros das proantocianidinas pode ajudar a prever sua eficácia global como componentes funcionais da dieta. A extrusão de sorgo com

taninos (extrudados expandidos diretos) provoca uma redução global no conteúdo extraível de tanino, mas melhora significativamente (2-6 vezes) os níveis de procianidinas de baixo peso molecular (AWIKA et al., 2003).

Os taninos têm habilidade para formar complexos com proteínas dietéticas e enzimas digestivas, o que contribui na redução da digestibilidade proteica (EMMAMBUX e TAYLOR, 2003). O complexo tanino-proteína está formado por ligações de hidrogênio entre grupos hidroxila fenólicos e ligações amida das proteínas (BRAVO, 1998). A remoção dos fenólicos pode levar a um aumento nas interações hidrofóbicas proteína-proteína (agrupamento dos resíduos apolares no interior da proteína) (BELTON, et al., 2006) e consequentemente alterar a funcionalidade das kafirinas (TAYLOR, et al., 2007). Os taninos não são afetados pelas enzimas e quando tratados com ácido, decompõem-se em antocianidinas e repolimerizam-se em flobafenos amorfos (MOHARRAM e YOUSSEF, 1995).

Os taninos e os fitatos são considerados fatores antinutricionais das proteínas vegetais. Os taninos reagem covalentemente com os grupos ϵ -amino dos resíduos de lisina. Em consequência se inibe a clivagem catalisada pela tripsina dos polipeptídeos nos sítios de lisina (NACKZK e SHAHIDI, 1995; BeMILLER e HUBER, 2008).

2.1.3.6 Antocianinas

As antocianinas são pigmentos solúveis em água, sendo usualmente vermelhas, em solução ácida, violeta em solução neutra e azul em solução alcalina. As antocianinas são antocianidinas glicosiladas. Os açúcares mais comuns são a glicose, galactose, ramnose e arabinose (como 3-glicosídeos ou 3,5-diglicosídeos) (PIETTA et al., 2003).

Nip e Burns (1969, 1971) identificaram apigeninidina, apigeninidin-5-glucosídeo, luteolinidina e luteolinidin-5-glucosídeo em variedades de sorgo vermelho e branco. Gous (1989), também reportou apigeninidina e luteolinidina como as maiores antocianinas do sorgo variedade preta. 7-O-methylapigeninidina (PALE et al., 1997), fisetinidina (BLESSIN et al., 1963), cianidina e pelargonidina (YASUMATSU et al., 1965) também foram reportados no sorgo. As antocianinas mais comuns no sorgo são as 3-deoxiantocianidinas que incluem apigeninidina e luteolinidina, de distribuição natural restrita na forma de agliconas. São distinguidas pela falta de um grupo hidroxila na posição C-3 (CLIFFORD, 2000). As 3-deoxiantocianidinas são mais estáveis em soluções ácidas em relação às antocianidinas comumente encontradas em frutas, legumes e outros cereais. Isso sugere uma vantagem potencial do sorgo como uma fonte comercial viável de antocianinas, especialmente a variedade preta (AWIKA e ROONEY, 2004).

2.2 Extrusão termoplástica de alimentos

Literalmente, "extrusão" (da palavra latina *extrudere*) significa a ação de empurrar para fora. Na área de engenharia, descreve uma operação de forçar um material para fora por uma abertura estreita (BERK, 2009). A extrusão termoplástica de alimentos é definida como um processo termomecânico pelo qual, materiais amiláceos e/ou proteínicos são plasticizados com água e cozidos em um tubo, pela combinação de câmbios de pressão, transferência de calor e massa, e cisalhamento mecânico (SMITH, 1976; BERK, 2009). É um processo contínuo e de um único estágio, onde ocorrem simultaneamente diversos efeitos, como mistura, amassado, transporte, fusão, cozimento, esterilização, secagem, resfriamento, expansão e formatação. Por envolver altas temperaturas e pressões, umidade e trabalho

mecânico, promovem a transformação dos alimentos quanto as suas características químicas, físicas e nutricionais (ASCHERI e CARVALHO, 1997; RIAZ, 2000; GUY, 2002).

As transformações incluem hidratação do amido e proteínas, gelatinização do amido, liquefação de gorduras, desnaturação de proteínas, destruição de fatores antinutricionais, inativação de enzimas e redução da carga microbiana, entre outras (MERCIER e CANTARELLI, 1986; FELLOWS, 2000). Atualmente, processos termomecânicos como a extrusão, estão sendo utilizados para melhorar as propriedades funcionais das fibras e incrementar seu nível de incorporação nos alimentos (ARTZ et al., 1990; CHANG et al., 2001). Pesquisas têm mostrado que o cozimento de fibras por extrusão pode produzir mudanças em suas características estruturais e propriedades físico-químicas, sendo o efeito principal uma redistribuição da fibra insolúvel para fibra solúvel (CAMIRE et al., 1990; LARREA et al., 2005).

Esta tecnologia possibilita com pouca ou nenhuma modificação dos equipamentos básicos, e um controle apropriado do processo, a produção de uma grande variedade de produtos: salgadinhos, petiscos, torradas, cereais matinais, macarrões, produção de proteína vegetal texturizada, amidos modificados, hidrólise parcial de caseinatos, extração de óleo de soja, descontaminação de temperos, esterilização de sementes de cacau antes da torrefação, produtos cárneos e rações animais, entre outros (EL-DASH, 1981; CAMIRE et al., 1990; FELLOWS, 2000; CHANG et al., 2001). Também é possível a produção de farinhas extrudadas utilizados na formulação de sopas de preparo rápido, bebidas lácteas, molhos semiprocessados, alimentos infantis, goma de mascar e produtos de confeitaria, entre outros (CHEYNE et al., 2005).

Os cereais e materiais ricos em amido mais usados no processo de extrusão incluem: trigo, milho, arroz, farinha e amido de batata. Outras fontes amiláceas de menor uso são: aveia, cevada, centeio, mandioca, sorgo, triticale, amaranto e quinoa (GUY, 2002).

No caso de proteínas texturizadas, são usadas como matérias-primas sementes de oleaginosas, girassol, leguminosas (feijão e soja) e alguns subprodutos agroindustriais tais como farelo de arroz, quireira de arroz, pedúnculos de caju, torta de soja, farelo de trigo, subprodutos da extração de oleaginosas, farinha de pescado, resíduos de frutos do mar, entre outros (ASCHERI e CARVALHO, 1997; CHANG et al., 2001).

O esquema do extrusor de duplo parafuso Clextral Evolum HT25 apresenta-se na **Figura 8**, cujos elementos principais são:

- Um canhão compartilhado em cilindros modulares (1, 2,... 10) para o controle da temperatura, os dispositivos de aquecimento e resfriamento incluem camisas de água e aquecedores com resistência elétrica e indução;
- Dois parafusos sem fim, que transporta a matéria-prima;
- A matriz, que modela o produto na forma desejada; um dispositivo para cortar o extrudado emergindo da matriz (faca rotativa);
- Um mecanismo de alimentação, que pode ser vertical ou horizontal;
- Um motor-redutor de engrenagens, com capacidade de variação de velocidade e controle de torque;
- Instrumentos de medição e controle.

Em extrusores de duplo parafuso, o sentido de giro dos parafusos pode ser em co-rotação ou em contra rotação, com diferentes quantidades de entrelaçado, passo e afastamentos, os quais afetam as características de processamento da máquina (MARTELLI, 1983).

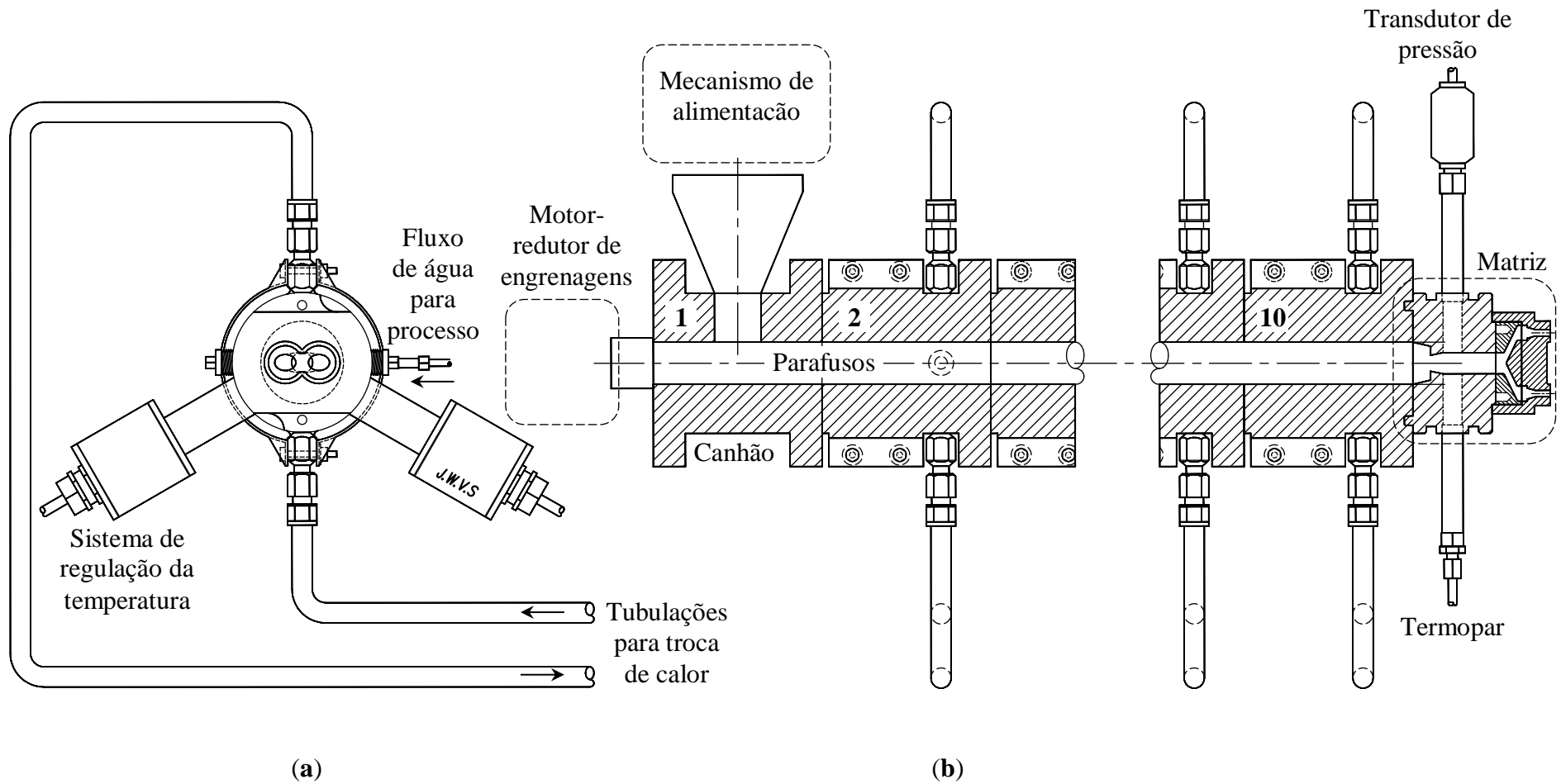


Figura 8. Esquema do extrusor de duplo parafuso Cleextral Evolum HT25: (a) vista frontal, (b) vista lateral esquerda. (1) módulo de alimentação GG1, (2) até (10), módulos fechados FER.

Uma vez que o flight de um parafuso acopla-se no canal do outro parafuso, evita-se que o material permaneça aderido e gire junto com a rotação dos parafusos e, portanto, incentiva o movimento da massa para frente com escorregamento reduzido (JANSEN, 1978). Isto também melhora a mistura de materiais nos canais dos parafusos.

O extrusor de duplo parafuso do tipo contra rotativo pode proporcionar melhores características de fluxo de material, empurrando o material de forma positiva para a frente em direção à matriz, mas reduzindo o grau de mistura dos materiais no interior do extrusor. Outra característica indesejável é que as forças de separação entre os parafusos pode causar desgaste severo das paredes laterais. Por sua vez, o extrusor de duplo parafuso do tipo co-rotativo, oferece vantagens adicionais, tais como o equilíbrio da pressão em planos transversais dos parafusos e a ação de limpeza dos flights, devido às velocidades lineares opostas nos flights da região de entrelaçado (SENANAYAKE e CLARKE, 1999).

2.3 Biscoitos

O Brasil ocupa a posição de segundo maior produtor mundial de biscoitos, com o registro de 1.220 milhões de toneladas produzidas em 2011 (DOCEREVISTA, 2013). Os principais segmentos de consumo estão distribuídos nas regiões de São Paulo (27%), Rio de Janeiro (13%) e Minas Gerais (11%) (SIMABESP, 2013).

Os biscoitos ou bolachas são os produtos obtidos pela mistura de farinha(s), amido(s) e ou fécula(s) com outros ingredientes, submetidos a processos de amassamento e cocção, fermentados ou não. Podem apresentar cobertura, recheio, formato e textura diversos (ANVISA, 2005). Possuem um teor de umidade final muito baixo (1–5%) em comparação a pães e bolos terminados, que tipicamente apresentam teores de umidade de 35–40% e 15–30% respectivamente (HAZELTON, DESROCHERS e WALKER, 2003).

São classificados de acordo com o ingrediente que o caracteriza ou forma de apresentação. Os biscoitos doces são os produtos que contêm açúcar, além das substâncias normais nesse tipo de produtos (ANVISA, 2005). Os ingredientes básicos são: farinha de trigo, açúcar e gordura. Os outros ingredientes incluem, em quantidades menores: leveduras, agentes químicos de fermentação, xaropes, sal e emulsificantes (PAREYT e DELCOUR, 2008).

A farinha de trigo fornece a matriz em torno da qual, os demais ingredientes são misturados para formar a massa (MANOHAR e RAO, 1997). A farinha mais adequada para fazer biscoitos deve ser de trigo brando de baixo teor de proteínas (8 a 10%). Em produtos assados quimicamente fermentados, um nível de proteína mais baixo produz uma estrutura celular que proporciona uma boa sensação na boca e uma textura menos elástica (HUI, 2006).

Outras farinhas destinadas para biscoitos incluem produtos obtidos de partes comestíveis de uma ou mais espécies de cereais, leguminosas, frutos, sementes, tubérculos e rizomas, por moagem e ou outros processos tecnológicos considerados seguros para produção de alimentos (ANVISA, 2005).

O biscoito, apesar de não ser um alimento básico como o pão, é consumido por pessoas de qualquer idade e possui uma longa vida de prateleira, permitindo que sejam produzidos em grandes quantidades (MANOHAR e RAO, 1997). O mercado de biscoitos em Brasil é segmentado em nove categorias maiores, as principais delas ocupam os biscoitos recheados (30%) e, os crackers e biscoitos de água e sal (25%). Os biscoitos doces e amanteigados detêm 8% dos produtos comercializados (SIMABESP, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local de execução

O processo de extrusão foi conduzido em Embrapa Agroindústria de Alimentos, planta piloto IV. As avaliações físicas das matérias primas e produtos foram realizados nos laboratórios de cereais e reologia. A composição química das matérias primas foi realizada nos laboratórios de físico-química, minerais, cromatografia e laboratório da planta piloto V.

3.2 Material

3.2.1 Sorgo

Grãos integrais de sete genótipos de *Sorghum bicolor* L. Moench foram fornecidos pela EMBRAPA Milho e Sorgo (Sete Lagoas, MG, Brazil): CMSXS180 e 9010032 (pericarpo branco, sem testa); BRS310 e BRS308 (pericarpo vermelho, sem testa); BRS305, 9929034 e BR700 (pericarpo marrom claro, com testa). Os grãos acondicionados em sacolas de papel de 15 kg foram armazenados em temperatura de refrigeração até o processo de moagem. A diferença da cor do pericarpo de seis genótipos de grãos integrais de sorgo é ilustrada na **Figura 7**.

3.2.2 Insumos

Para formular biscoitos foram utilizados os seguintes insumos nacionais: amido de milho (Chinezinho), bicarbonato de amônio (Synth, pureza 99%), bicarbonato de sódio (Quimex, pureza 99,5%), sal (Cisne), gordura de palma (Croklaan), açúcar (União), soro de leite (Tangará Foods), baunilha (SKW Biosystems), ácido láctico (Nuclear, pureza 84,5%) e ovo batido.

3.3 Métodos

Na primeira etapa do estudo, grãos integrais dos genótipos apresentados na **Figura 9** foram moídos. As farinhas integrais foram processadas às mesmas condições operacionais de extrusão termoplástica usando uma primeira configuração dos parafusos. A segunda etapa do estudo consistiu em avaliar duas variáveis independentes de extrusão: frequência de rotação dos parafusos (X_1) e umidade de processamento (X_2), usando farinha integral de dois genótipos de sorgo: uma de baixo teor de taninos (selecionado na primeira etapa) e outra de alto teor de taninos (BR700).

Para o processo de extrusão da segunda etapa, modificou-se a configuração dos parafusos apenas nas duas últimas zonas. Em ambas as etapas do estudo foram avaliadas tanto variáveis dependentes de extrusão, quanto propriedades funcionais dos extrudados.

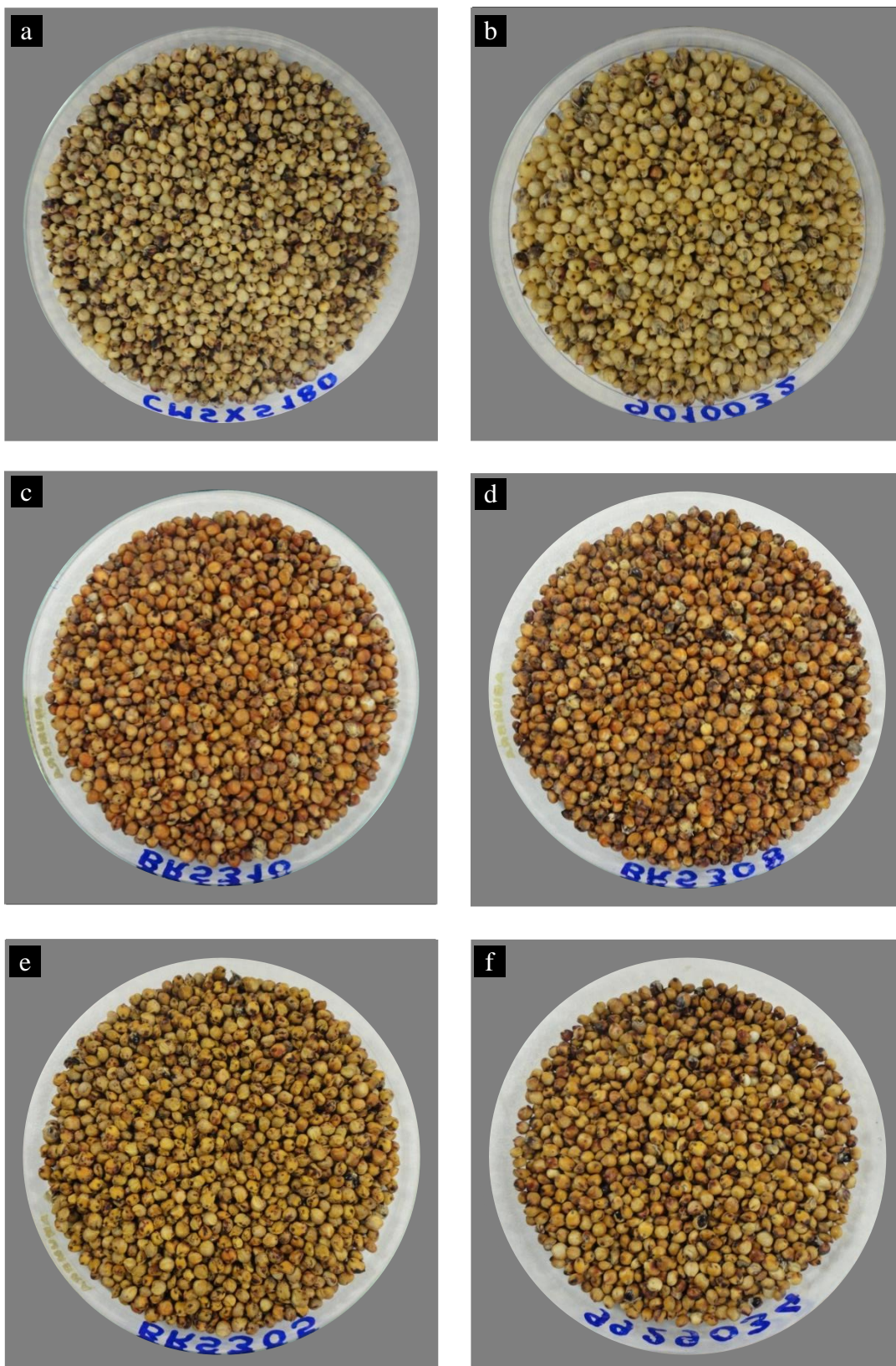


Figura 9. Grãos integrais de genótipos de sorgo. (a) CMSXS180, (b) 9010032, (c) BRS310, (d) BRS308, (e) BRS305, (f) 9929034.

3.3.1 Caracterização química

Os grãos integrais de sorgo foram limpos manualmente a fim de remover partículas estranhas. Imediatamente antes da análise, os grãos foram moídos usando um moinho de discos (MD) LM3600 (Perten Instruments AB; Huddinge, Suécia) com abertura de luz nº6 entre discos e, em seguida com moinho de martelos (MM) LM3100 (Perten Instruments AB, Huddinge, Suécia) equipado com uma peneira de 0,8 mm de abertura, a fim de atingir um tamanho de partícula desejável para as análises.

3.3.1.1 Composição centesimal, fibra detergente neutro e fitatos

Foram quantificados em duplicata e de acordo com a AOAC (2010): teor de umidade (método 925,09), nitrogênio total (método 2001,11; um fator de 5,75 foi usado para converter nitrogênio total em proteína total), teor de lipídeos (método 945,38), teor de cinzas (método 923,03), fibra detergente neutro (método 2002,04) e teor de fitatos (método 986,11).

3.3.1.2 Taninos condensados

Foi determinado através do teste da vanilina segundo descrito por BURNS (1971) e, DESHPANDE e CHERYAN (1985) com modificações. As amostras moídas (10 g) foram desengorduradas com éter de petróleo (20 mL) em um dispersor T25 basic Ultra-Turrax (Ika® Werke, Staufen, Alemanha) a 9500 min^{-1} durante 3 min. A extração de taninos foi realizada usando 1–6 g de amostras desengorduradas, de acordo com o genótipo de sorgo, com 15 mL de solução HCl/metanol a 10% (v/v) em um agitador tipo Vortex Genie 2 Scientific Industries (Bohemia, NY, USA) durante 1 min seguido por banho de ultrassom Branson 2210 (VWR Scientific, Bridgeport, NJ, USA) durante 10 min. A mistura foi mantida a 4°C durante 8 h e em seguida filtrada. Uma alíquota do extrato filtrado foi adicionado às soluções de vanilina a 4% e HCl/metanol a 10% (branco). Após 20 min de reação, as cores resultantes foram lidas em espectrofotômetro UV-1800 (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japão) a 500 nm. Os taninos condensados foram quantificados usando uma curva de calibração de catequina e os resultados foram expressos como miligramas de catequina por grama de amostra.

3.3.1.3 Perfil de antocianinas

A análise do perfil de antocianinas foi determinada nos genótipos BRS310 e BR700, por duplicata. A amostra moída e desengordurada (1 g) foi pesada sob um tubo de centrifuga de 15 mL e foi extraída 4 vezes com 3 mL de solução metanólica (v/v) de ácido fórmico a 10% em um agitador tipo Vortex durante 1 min e em seguida sob banho de ultrassom durante 10 min. A mistura foi centrifugada a 6000 min^{-1} durante 10 min em uma centrifuga Hettich EBA 12 (Tuttingen, Alemanha). O extrato decantado foi filtrado com papel filtro nº40 (Whatman Inc., Maidstone, UK). A reunião dos extratos filtrados foi avolumado para 10 mL, transferido para um frasco de vidro âmbar e armazenado sob refrigeração. No dia seguinte foi evaporado sob fluxo de ar comprimido e, em seguida resuspendido em 1 mL de solução aquosa (v/v) de ácido fórmico-metanol a 5%–10%. A alíquota resuspendida foi transferida para um microtubo de 2 mL e, em seguida centrifugada a 6000 min^{-1} durante 5 min em uma centrifuga HSIANGTAI MCD-2000 (Taiwan, China). Depois foi colocado em um “vial” com redutor de volume com o intuito de usar 100 µL de extrato.

Os extratos foram analisados em um sistema Alliance 2695 (Waters Corp., Milford, MA, USA) acoplado a um detector de arranjo de fotodiodos Waters 2996. As antocianinas do sorgo foram separadas usando uma coluna C₁₈ Thermo Scientific (Utah, USA) de dimensões:

100 mm × 4,6 mm; tamanho de partícula 2,4 µm. A temperatura da coluna foi mantido a 40°C e o volume de injeção foi 20 µL. A fase móvel consistiu de uma solução aquosa de ácido fórmico a 5% (v/v) (Solvente A) e acetonitrila (Solvente B). A velocidade de fluxo da fase móvel foi 1,0 mL/min. As 3-desoxiantocianinas foram separadas usando o seguinte gradiente: 0–2 min, 5–7% B; 2–10 min, 7–10% B; 10–15 min, 10–13% B; 15–16.5 min, 13–20% B; 16.5–18 min, 20–5% B; 18–20 min, 5% B. A detecção foi realizada a 520 nm. A identificação das antocianinas do sorgo foi determinada baseada em espectros UV e literatura. A quantificação de cada composto foi realizada por comparação das áreas percentuais abaixo dos picos. Os dados foram coletados e processados usando o software Empower (Waters Corp., Milford, MA, USA).

3.3.1.4 Composição em minerais

Foram quantificados em duplicata, os seguintes minerais (mg·100 g⁻¹): sódio (Na), potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca), manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), fósforo (P), cobalto (Co), cromo (Cr), molibdênio (Mo), selênio (Se), chumbo (Pb) e alumínio (Al). 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 (ICP-OES – AOAC, 2005).

3.3.1.5 Composição em aminoácidos

Foi realizado de acordo com Liu et al. (1995) e segundo o método 994.12 da AOAC (2005). Os seguintes aminoácidos (g/100 g) foram quantificados em duplicata: asparagina (ASP), serina (SER), glutamina (GLU), glicina (GLY), histidina (HIS), arginina (ARG), treonina (THR), alanina (ALA), prolina (PRO), tirosina (TYR), valina (VAL), lisina (LYS), isoleucina (ILE), leucina (LEU) e fenilalanina (PHE). As amostras foram hidrolisadas com HCl 6N a 110°C durante 24 horas. Os hidrolisados foram analisados em um sistema Alliance 2695 (Waters Corp., Milford, MA, USA) acoplado a um detector de fluorescência Waters 2475. A coluna de separação foi uma ACCQ-TAG de dimensões: 150 mm × 3,9 mm; tamanho de partícula 4 µm. A fase móvel consistiu de dois eluentes: (A) ACCQTAG e (B) acetonitrila em água. Um conjunto de padrões de aminoácidos foi analisado por cada amostra. A identificação dos aminoácidos nas amostras foi realizada por comparação dos tempos de retenção dos padrões.

3.3.2 Produção de farinhas cruas

Um dia antes prévio ao processo de extrusão, foi realizado a redução do tamanho de partícula dos grãos integrais de sorgo isentos de partículas estranhas, usando o MD e operado na abertura n°2. As farinhas produzidas foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em temperatura ambiente.

3.3.2.1 Umidade

A umidade da farinha para extrusão (U_s) foi determinada por termogravimetria, em duplicata. Foram pesados $2 \pm 0,005$ g de farinha e secados a 105°C em balança de umidade MOC-120H (Shimadzu, Japão) até atingir uma umidade remanente na farinha, inferior a 0,05% (base úmida).

3.3.2.2 Distribuição granulométrica

Foi realizada em duplicata, por segregação de 100 g de farinha, retido no topo de peneiras padronizadas de aço inox (Newark, U.S.A.) após 10 min de peneiramento em ROTAP RX-29-10 (W.S. Tyler, St. Albans, WV, USA). Sete aberturas de peneira foram selecionadas (1,68; 1,4; 1,18; 1; 0,71; 0,3 e 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 GT4100 (Ohaus, Precision Advanced). O cálculo de partículas retidas (R_n) em $g \cdot 100 g^{-1}$, foi realizado com a equação (1).

$$R_n = m_r - m_p \quad (1)$$

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 n vacia.

3.3.3 Produção de extrudados

Foi conduzido usando um extrusor co-rotativo de dupla rosca Clextral Evolum HT25 (Clextral, Inc., Firminy: França) com diâmetro do parafuso 25 mm, razão comprimento/diâmetro de 40:1 e dez zonas de temperatura. O perfil de temperatura a partir da zona de alimentação foi fixado em 30, 30, 60, 90, 100, 100, 120, 120, 150, 150°C para todos os experimentos.

O conjunto da placa frontal (matriz) consistiu de três partes: placa central coletora, placa distribuidora e placa porta-insertos (**Figura 10**). A pressão da massa fundida foi medida com um transdutor de pressão (Dynisco Instruments, Franklin, MA, USA) acoplado na placa central coletora. A placa porta-insertos usada teve quatro furos, cada um de 3,8 mm de diâmetro e 14 mm de comprimento.

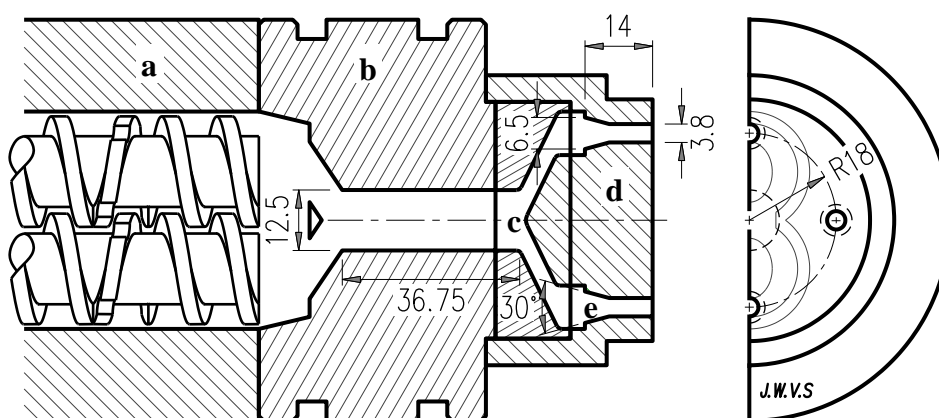


Figura 10. Vista superior em secção transversal do conjunto da placa frontal (matriz) do extrusor Clextral Evolum HT25: (a) cilindro; (b) placa central coletora; (c) placa distribuidora; (d) placa porta-insertos; e (e) furo do inserto. Dimensões em mm.

As farinhas de sorgo foram alimentadas na zona de alimentação do extrusor usando um alimentador gravimétrico de perda de peso, de dupla rosca, modelo GRMD15 (Schenck Process, Darmstadt, Alemanha) a uma vazão de sólidos fixada em $9 kg \cdot h^{-1}$, o seu

monitoramento foi realizado com o software Schenck Process Easy Serve (Schenck Process, Darmstadt, Alemanha).

Água destilada foi injetada entre a primeira e a segunda zona modular através de um porto de 5,25 mm de diâmetro interno utilizando uma bomba dosadora de êmbolo modelo J-X 8/1 (AILIPU Pump Co. Ltd., China), adaptado para compensar as diferenças de umidade nas farinhas e fornecer a umidade de processo desejada. A bomba foi calibrada antes de cada processo de extrusão. A taxa de alimentação de água (W) requerida durante cada processo de extrusão foi calculada segundo a equação (2).

$$W = \frac{S(U - U_s)}{100 - U} \quad (2)$$

Onde S é a taxa de alimentação de sólidos ($9 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$), U é a umidade de extrusão desejada e U_s é a umidade dos sólidos (farinhas de sorgo).

Os extrudados cilíndricos foram coletados ao longo de 15 minutos sobre bandejas de plástico, interrompendo o fluxo de produto extrudado cada 50–60 cm de comprimento. Após 5–10 min de repouso ao ambiente, foi realizada a amostragem dos extrudados cilíndricos para serem analisados quanto às propriedades de expansão e propriedades mecânicas. O material extrudado remanescente foi secado em um forno com circulação de ar a 60°C durante 4h. Ao término da secagem o material foi triturado manualmente e os pedaços de produto foram empacotados em sacolas de plástico de alta densidade e armazenados a 7°C , para as análises posteriores.

3.3.3.1 Taxa de fluxo mássico

Foi realizada coletando em sacolas de plástico uma quantidade de massa extrudada à saída da matriz durante um período de 30 s. A massa coletada foi registrada com balança semi-analítica SB12001 (Mettler Toledo, Suíça). O cálculo da taxa de fluxo mássico (Q) em $\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$ foi realizado com a equação (3).

$$Q = \frac{m}{t} \quad (3)$$

Onde m é a massa coletada, em kg; e t é o tempo de coleta, em h ($t = \frac{1}{12} \text{ h}$).

3.3.3.2 Variáveis dependentes de extrusão

O torque, pressão da caixa de engrenagens (p_g), pressão na placa frontal (p_f) e temperatura da massa fundida (T_f) foram registrados pelo software FITSYS Plus (Clextral, Inc., Firminy, França), após um período mínimo de variação do torque e a pressão.

A energia mecânica específica (EME) foi calculada de acordo com Fan et al. (1996) usando a equação (4).

$$EME = \frac{\text{Entrada de energia mecânica}}{\text{Taxa de fluxo mássico}} = \frac{T \times 2\pi F' \times n}{\left(\frac{Q}{60}\right)} \quad (4)$$

Onde T é o torque gerado pelos parafusos em kJ (registrado em % no software FITSYS Plus e convertido a kJ multiplicando pelo fator 0,1076 provido pelo fabricante); F' é

a frequência de rotação dos parafusos, em min^{-1} , registrado pelo software FITSYS Plus; n é o número de parafusos; e Q é a taxa de fluxo mássico de extrudado, em $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$.

3.3.3.3 Efeito do genótipo de sorgo

Foi avaliada a extrusão termoplástica dos seis genótipos de sorgo apresentados na **Figura 9**. Farinhas integrais derivadas de grãos de pericarpo branco (CMSXS180; 9010032), vermelho (BRS310; BRS308) e marrom claro (BRS305; 9929034) foram extrudadas a condições operacionais constantes:

- Frequência de rotação dos parafusos: $F = 600 \text{ min}^{-1}$;
- Umidade de extrusão: $U = 14 \%$.

A configuração de parafusos usada é representada na **Figura 11a**. Os extrudados expandidos produzidos foram analisados quanto ao índice de expansão seccional, densidade aparente, e propriedades de hidratação.

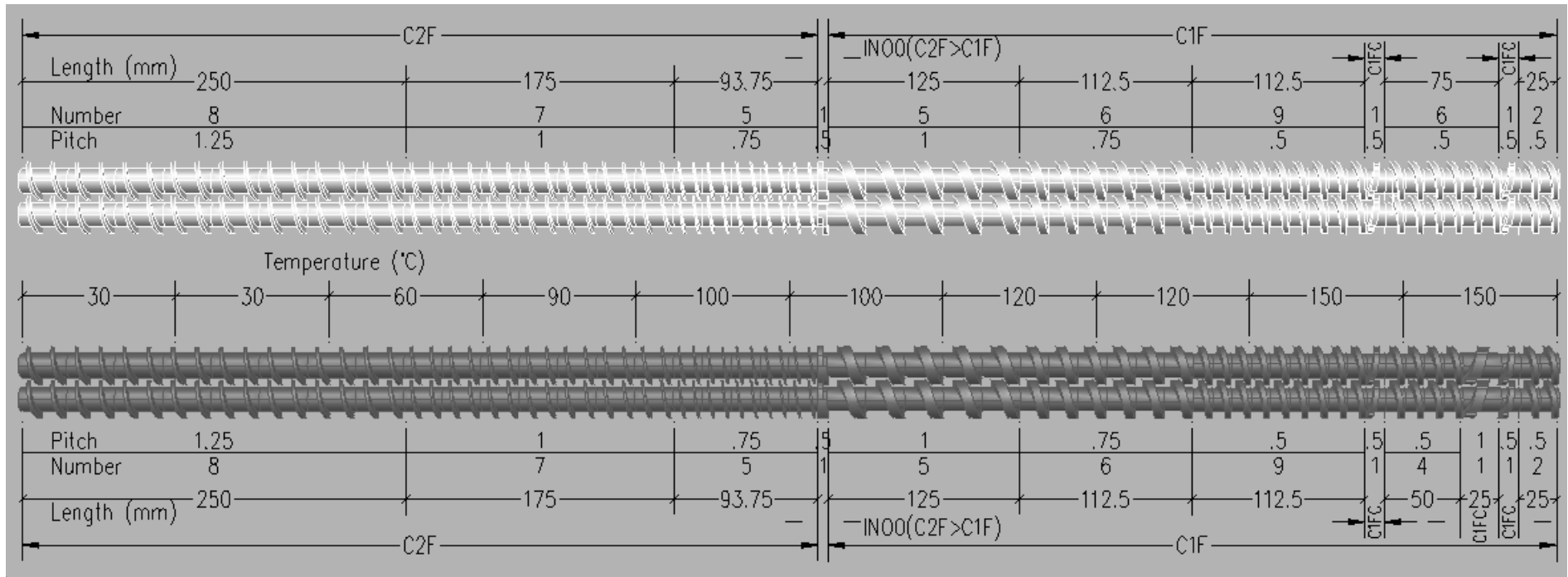
3.3.3.4 Efeito da rotação dos parafusos e umidade de extrusão

Foi avaliada a extrusão termoplástica de dois genótipos de sorgo, de baixo e alto teor de taninos. Farinhas integrais derivadas de grãos de pericarpo vermelho (baixo teor de taninos) selecionado no item 3.3.3.3 e pericarpo marrom claro (alto teor de taninos, BR700) foram extrudadas variando:

- Frequência de rotação dos parafusos: $F = 300 - 700 \text{ min}^{-1}$;
- Umidade de extrusão: $U = 14 - 26\%$.

A configuração de parafusos usada é representada na **Figura 11b**. Os extrudados expandidos produzidos foram analisados quanto a suas propriedades de expansão, propriedades mecânicas, hidrotérmicas e cor instrumental.

(a)



(b)

J.W.V.S

Figura 11. Representação esquemática da configuração de parafusos por cada zona de temperatura: (GG1) módulo de alimentação; (FER) módulos fechados; (C1F/C2F) parafuso de transporte de passo simples/duplo; (INO0) parafuso de interfase para a transição entre parafusos de passo simples e duplo; e (C1FC) parafuso reverso de passo simples, entalhado.

3.3.4 Propriedades de expansão e densidade aparente

A expansão da massa fundida esta relacionada ao grau de porosidade no produto extrudado, a qual afeta as propriedades mecânicas e de transporte tais como taxa de cisalhamento e difusão de aromas (WŁODARCZYK-STASIAK e JAMROZ, 2009).

O índice de expansão seccional (*IES*) foi realizado pela medição do diâmetro com paquímetro manual de 150 mm (Vonder®, Curitiba, Brasil), nos extremos e ao centro de cada peça cilíndrica de extrudado. Um total de vinte peças foi medido por tipo de extrudado. O calculo foi realizado de acordo com a equação (5) (ALVAREZ-MARTÍNEZ et al., 1988).

$$IES = \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \quad (5)$$

Onde D_0 é o diâmetro dos furos da placa porta-inserto ($D_0 = 3,8$ mm) e D é o diâmetro médio de uma peça cilíndrica de extrudado após resfriamento.

A densidade aparente (ρ) do extrudado (em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) foi calculada usando a equação (6) (FAN et al., 1996).

$$\rho = \frac{4 m}{\pi \times D^2 \times L} \times 1000 \quad (6)$$

Onde, m é a massa (em g) de uma peça cilíndrica de extrudado de comprimento L (em mm). Um total de vinte leituras tanto para D quanto para L foram registradas por tipo de extrudado.

O índice de expansão longitudinal (*IEL*) e o índice de expansão volumétrica (*IEV*) foram determinados com as equações (7) e (8) de acordo com a metodologia descrita por Alvarez-Martínez et al. (1988).

$$IEL = \left(\frac{\rho_m}{\rho_e}\right) \left(\frac{1}{IES}\right) \left(\frac{100 - U_m}{100 - U_e}\right) \quad (7)$$

$$IEV = IES \times IEL \quad (8)$$

Onde ρ_m é a densidade da massa entrando à matriz, considerada como $1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ρ_e é a densidade do extrudado, calculado com a equação (5); U_m é a umidade da massa entrando à placa frontal, calculado com a equação (9); U_e é a umidade do extrudado recentemente resfriado. U_e foi determinada em duplicata de acordo com o método gravimétrico 925,09 da AOAC (2010).

$$U_m = \frac{S' \times U_s + 100 W'}{S' + W'} \quad (9)$$

Onde S' e W' são a taxas de alimentação de sólidos e água, registrados pelo software FITSYS Plus (Clextral, Inc., Firminy, França), após um período mínimo de variação do torque e a pressão.

3.3.5 Propriedades mecânicas dos extrudados

As amostras usadas na determinação do (*IES*) foram secas em forno com circulação de ar (WTB Binder, Tuttlinger, Alemanha) a 60°C até atingir uma umidade remanescente

inferior a 4% (aproximadamente 4 h). Seguidamente as peças foram resfriadas em dessecador até temperatura ambiente.

As propriedades mecânicas dos extrudados foram medidas usando o teste de punctura com 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 sonda desceu a $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, quando atingiu uma força de contato de 0,196 N sob a amostra, a perfuração se iniciou a $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ até o 50% do diâmetro do extrudado ($D/2$). A continuação a sonda ascendeu a $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ até uma altura de 20 mm. Um total de 25 perfurações foi realizado por cada tipo de extrudado. Os picos de forças de compressão (F) em N, e o tempo correspondente (t) em min (**Figura 12**) foram registrados pelo software Exponent versão 4.0.13.0 (Stable Micro Systems, Surrey, Inglaterra).

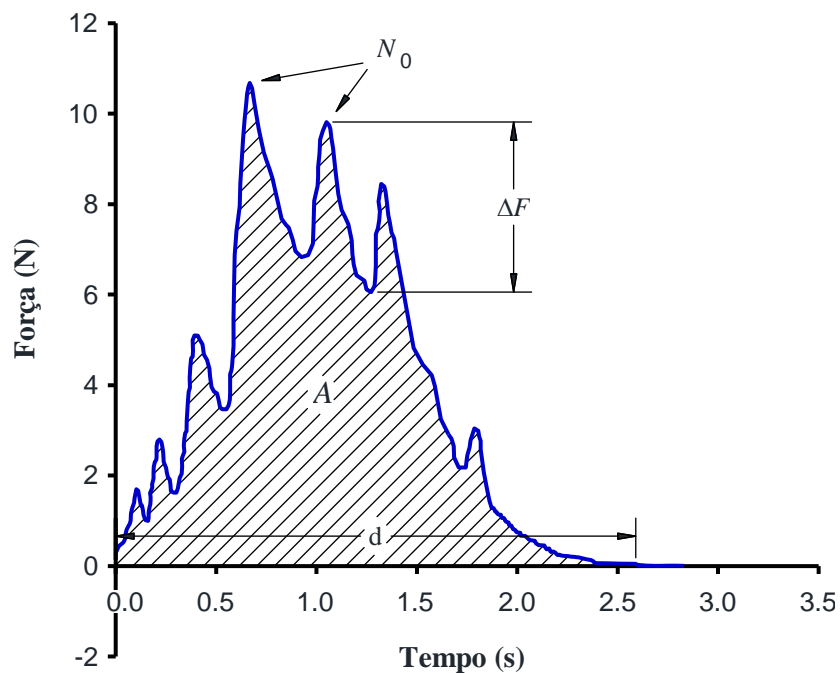


Figura 12. Curva de forças de compressão de um extrudado. N_0 , número total de picos; d , distancia de compressão do produto (mm); ΔF , força de queda aplicada, por pico (N); A , área sob a curva de forças que provocou a deformação (mm^2).

A frequência de rupturas estruturais (N_{sr}) em mm^{-1} foi calculada com a equação (10) (BOUVIER et. al., 1997):

$$N_{sr} = \frac{N_0}{d} \quad (10)$$

Onde N_0 é o número total de picos e d é a distancia de compressão do produto (mm). A média da força específica de rupturas estruturais (F_{sr}) em N; foi calculada com a equação (11) (BOUVIER et. al., 1997):

$$F_{sr} = \sum \frac{\Delta F}{N_0} \quad (11)$$

Onde ΔF é a força de queda aplicada, gerada por cada pico. A média das forças de

compressão (F_c) em N; foi calculada com a equação (12) (BOUVIER et. al., 1997):

$$F_c = \frac{A}{d} \quad (12)$$

O trabalho de crocância (W_c) em N·mm foi calculado com a equação (13) (BOUVIER et. al., 1997), onde A corresponde à área sob a curva de forças de compressão que provocou a deformação (mm^2):

$$W_c = \frac{A}{N_{sr}} \quad (13)$$

3.3.6 Propriedades de hidratação

Os extrudados secos foram moídos de acordo ao item 3.3.1 e em seguida peneirados de acordo ao item 3.3.2.2 usando aberturas de peneira de 0,212; 0,106 e um fundo. A fração retida no topo da peneira 0,106 mm foi usada para a determinação do ISA, IAA e viscosidade de pasta (BECKER et al., 2001). Para efeitos de comparação, as propriedades hidrotérmicas também foram determinadas em amostras de farinha crua.

ISA e IAA foram realizados de acordo com a metodologia descrita por Anderson et al. (1969) com modificações. Uma massa de 1 ± 0.0005 g de amostra foi transferida para um tubo de centrífuga, adicionou-se 5 ml de água deionizada, misturou-se por 20 s sob agitador tipo vortex (Genie 2 Scientific Industries, Bohemia, NY, USA) e em seguida adicionou-se outros 5 ml de água deionizada para lavar qualquer partícula aderida à parede do tubo. Depois, a mistura foi mantida a $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ durante 30 min em um banho de água tipo Dubnoff NT 232 (Novatecnica, Piracicaba, SP, Brasil) para permitir uma hidratação completa. O gel formado foi centrifugado a 9000 rpm ($9961 \times g$) a 25°C durante 15 min em uma centrífuga Universal 320R (Hettich, Tuttingen, Alemanha).

O sobrenadante foi cuidadosamente transferido para um prato de evaporação previamente tarado e seco em estufa com circulação de ar (WTB Binder, Tuttlinger, Alemanha) a 105°C durante 4 h para a medição de sólidos solúveis totais. O tubo com gel remanescente foi seco superficialmente com papel adsorvente, e pesado. As análises de ISA e IAA foram conduzidas em triplicata e o cálculo foi realizado usando as equações (14) e (15), modificado por Dogan e Karwe (2003).

$$ISA = \frac{\text{g sólidos solúveis em água}}{\text{g amostra seca}} = \frac{\text{g ss}}{\text{g}} \quad (14)$$

$$IAA = \frac{\text{g água absorvida}}{\text{g amostra seca} \times (1 - \text{fracção solúvel})} = \frac{\text{g w}}{\text{g si}} \quad (15)$$

3.3.7 Propriedades de pasta

Perfis de viscosidade de pasta foram determinados em duplicata, usando um analisador rápido de viscosidade RVA Series 4 (Newport Scientific, Warriewood, NSW, Austrália). O perfil de viscosidade de pasta por cada tipo de farinha peneirada, crua ou extrudada, foi medida usando 3,0 g de amostra com 14% de teor de umidade suspensa em uma quantidade de água destilada, de tal modo q a massa final foi $28 \pm 0,01$ g. Os picos de viscosidade (V) em **cP**, e o tempo correspondente (t) em min, foram registrados por um computador utilizando o software Thermocline (Newport Scientific, Warriewood, NSW, Austrália), usando o perfil de análise “extrusion 1 no-alcohol”, com uma duração de 20 min (**Figura 13**).

As amostras foram mantidas 2 min a 25°C, aquecidas a 95°C a 14 K·min⁻¹, mantidas a 95°C por 3 min e resfriadas a 25°C a 14 K·min⁻¹, sob agitação a 160 rpm. As propriedades de pasta foram avaliadas tomando em consideração a viscosidade máxima (V_{max}), viscosidade mínima após atingir a viscosidade máxima (V_{min}) e viscosidade final (V_{fin}).

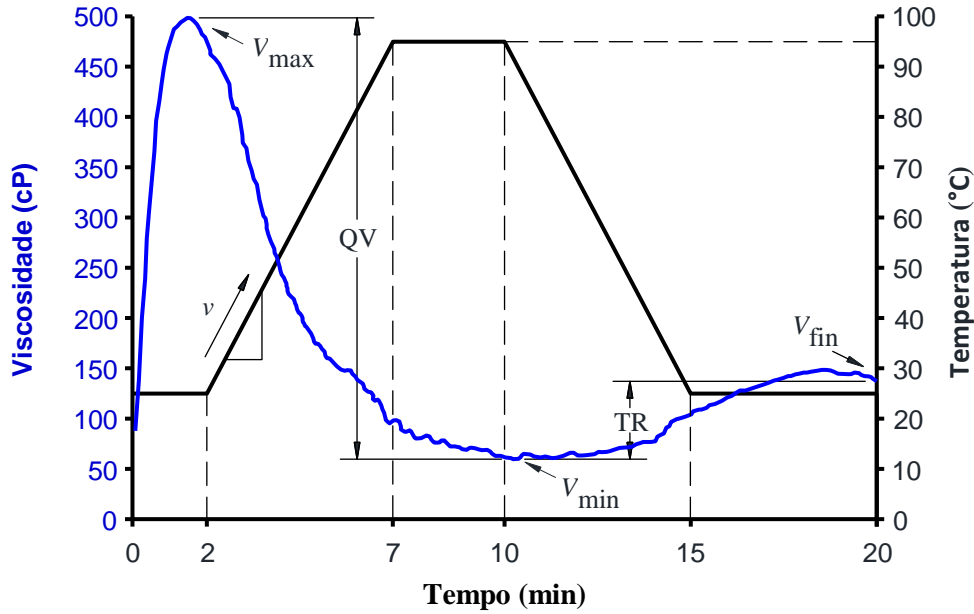


Figura 13. Curva de viscosidade de pasta de uma farinha extrudada, com agitação constante e perfil de temperatura de aquecimento-resfriamento. V_{max} , viscosidade máxima; V_{min} , viscosidade mínima; V_{fin} , viscosidade final; QV , quebra da viscosidade; TR , tendência à retrogradação.

A quebra de viscosidade (QV) ou “Breakdown” e a tendência à retrogradação (TR) ou “Setback” foram calculadas com as equações (16) e (17).

$$QV = V_{max} - V_{min} \quad (16)$$

$$TR = V_{fin} - V_{min} \quad (17)$$

3.3.8 Diferença total de cor

Grãos integrais de sorgo e seus correspondentes extrudados secos foram moídos e peneirados de acordo com o item 3.3.5.3. A cor das farinhas cruas e extrudadas, foi realizado por refletância diretamente no pó em quatro posições diferentes usando um colorímetro Color Quest XE, escala CIELAB e CIELCh, com abertura de 0,375 mm de diâmetro, com iluminante D65/10. As amostras foram dispostas em cubeta de quartzo de 10 mm. A color foi registrada usando uma escala CIE-L*a*b* (CIE-Lab), onde L* indica luminosidade, a* indica cromaticidade sob um eixo de verde (-) a vermelho (+), e b* indica cromaticidade sob um eixo de azul (-) a amarelo (+). A diferença total de cor (ΔE) foi determinada usando a equação (18).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (18)$$

3.3.9 Produção de biscoitos

Foi realizado considerando uma formulação básica de preparo de biscoitos (**Tabela 3**) de acordo com Pareyt e Delcour (2008). A farinha de trigo foi substituída por farinha de extrudada de sorgo e amido de milho (50%–50%).

Tabela 1. Formulação básica para o preparo de biscoitos.

Ingredientes	Quantidades
Farinha de trigo	200 g
Bicarbonato de amônio	4 g
Bicarbonato de sódio	2 g
Sal	2 g
Manteiga	60 g
Açúcar	80 g
Baunilha	0,2 g
Ácido láctico	0,2 g
Soro de leite em pó	10 g
Ovo batido	20 g

Fonte: Pareyt e Delcour (2008)

Todos os ingredientes foram pesados em balança semianalítica GT4100 (Ohaus, Precision Advanced). Manteiga, açúcar, baunilha, ácido láctico, soro de leite e ovo batido, foram batidos em batedeira doméstica durante 20 s. Em seguida a massa batida foi transferida para uma mesa de amassado para ser misturada com os demais ingredientes. O amassado foi realizado manualmente com adição de aproximadamente 50 ml de água.

A extensão da massa foi realizada com um rolo de madeira e o moldado da massa estendida sob uma plataforma de formatura retangular de $400 \times 50 \times 3$ cm (**Figura 16**).

Em seguida a massa moldada foi fatiada obtendo-se unidades moldadas de $50 \times 25 \times 3$ mm. O forno foi realizado em forno convectivo a 220°C durante 8–9 min, e em seguida se deixou repousar na parte superior do forno (aproximadamente 70°C) durante 30 min.

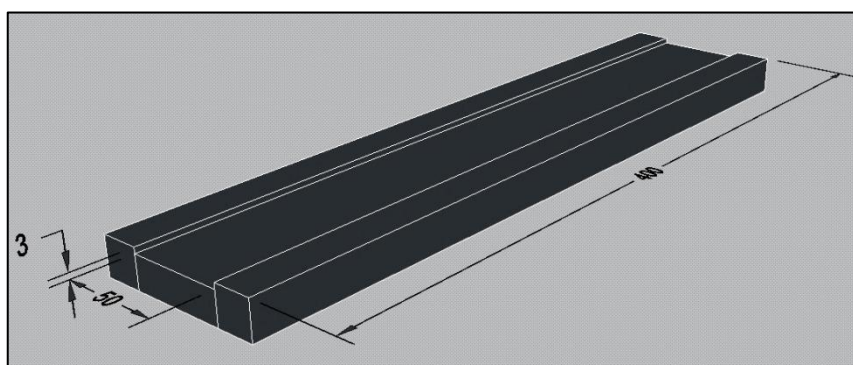


Figura 16. Forma de madeira utilizada para moldagem dos biscoitos. Dimensões em mm.

3.3.10 Propriedades mecânicas dos biscoitos

A dureza dos biscoitos foi medida usando o teste *three-point bending* com 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 retangular de ponta arredondada. Uma base rígida foi acoplada na plataforma do texturômetro e sob esta foi ajustada as lâminas de apoio inferior, separadas entre si por 2 cm e equidistantes do eixo da sonda retangular na parte superior. A sonda desceu a $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, quando atingiu uma força de contato de 0,098 N sob a amostra, a compressão se iniciou a $0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ até cortar o biscoito ao meio. A continuação a sonda ascendeu a $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ até uma altura de 20 mm. Um total de quinze compressões foi realizado por cada tipo de biscoito. O perfil de forças de compressão (F) em N e o tempo correspondente (t) em min (**Figura 17**) foram registrados por um computador utilizando o software Exponent versão 4.0.13.0 (Stable Micro Systems, Surrey, Inglaterra). A dureza correspondeu à força máxima (F_{max}) do primeiro pico significativo, no primeiro ciclo de compressão.

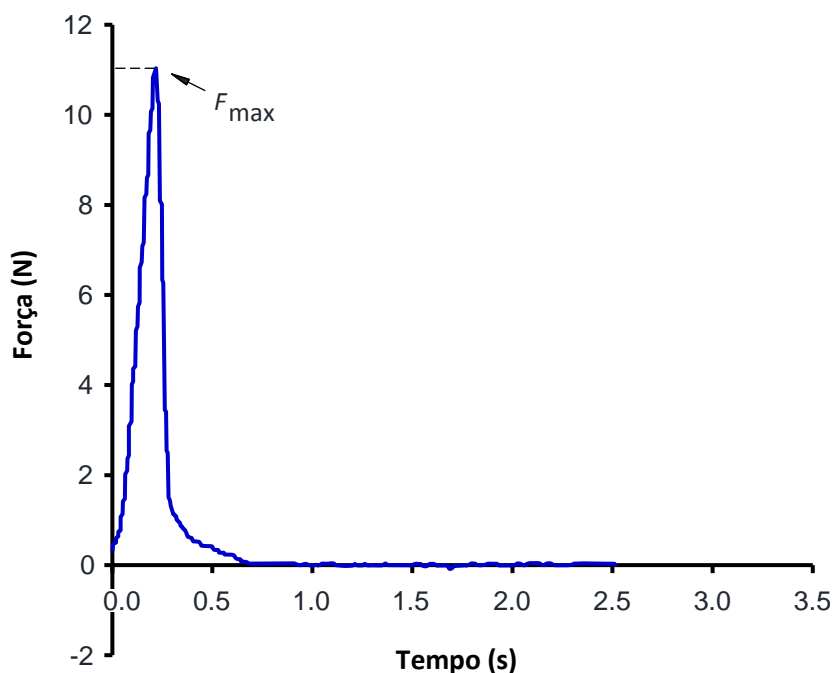


Figura 17. Curva de forças de compressão de um biscoito. F_{max} , dureza (N).

3.3.11 Delineamento experimental para o efeito do genótipo de sorgo

Um delineamento inteiramente ao acaso foi usado para avaliar o efeito dos seis genótipos de sorgo de pericarpo diferenciado (variável independente) sob as respostas de processo: EME e p_f ; e sob as respostas dos extrudados: IES , ρ , IAA e ISA .

3.3.12 Análise estatística para o efeito do genótipo de sorgo

As respostas do processo e dos extrudados obtidos como resultados do delineamento inteiramente ao acaso foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e as diferenças significativas entre as médias foram separadas por o teste de Tukey com um valor de $p < 0,05$.

3.3.13 Delineamento experimental para o efeito da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão

Um delineamento composto central rotacional (DCCR) com duas variáveis e dois níveis 2^2 (**Figura 14**) foi usado para avaliar os efeitos da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U) sob as respostas de processo ($EME; p_f$), respostas dos extrudados ($\rho; IES; IEL; IEV; N_{sr}; F_{sr}; F_c; W_c; IAA; ISA; \Delta E; V_{fin}; TR$) e respostas dos biscoitos (F_{max}). Os experimentos foram conduzidos ao acaso para minimizar erros sistemáticos por fatores estranhos.

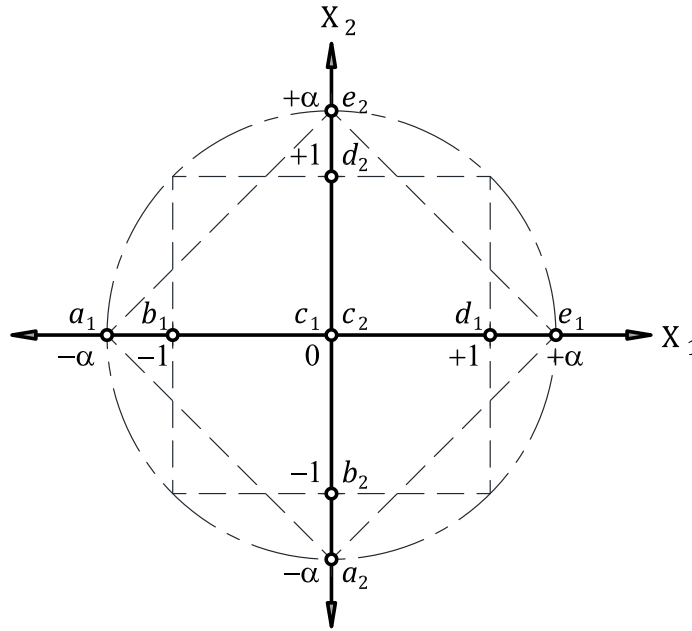


Figura 14. Delineamento composto central rotacional com duas variáveis independentes (X_i) e dois níveis (2^2). Valores reais: a_i, b_i, c_i, d_i, e_i ; Valores codificados: $\pm 1, 0, \pm\alpha$.

Os níveis do experimento foram estabelecidos dentro das possibilidades operacionais do equipamento e com base em estudos anteriores (CHINNASWAMY e HANNA, 1988; ASCHERI e CARVALHO, 1997). A variável X_1 foi definida como F , com um nível inferior $a_1 = 300 \text{ min}^{-1}$ e nível superior $e_1 = 700 \text{ min}^{-1}$. A variável X_2 foi definida como umidade de extrusão (U), com um nível inferior $a_2 = 14\%$ e nível superior $e_2 = 26\%$. Os valores reais no ponto central (c_i) foram calculados com a equação (19).

$$c_i = \frac{a_i + e_i}{2} \quad (19)$$

Os valores codificados nos pontos axiais ($\pm\alpha$) foram calculados com a equação (20), onde K é o número de variáveis independentes ($K = 2$).

$$\alpha = \pm(2^K)^{\frac{1}{4}} \quad (20)$$

Os valores reais nos pontos fatoriais ($b_i; d_i$) foram calculados com as equações (21) e (22).

$$b = (e - a) \left(\frac{\alpha - 1}{2\alpha} \right) + a \quad (21)$$

$$d = (e - a) \left(\frac{\alpha + 1}{2\alpha} \right) + a \quad (22)$$

A **Tabela 1** resume os cálculos dos valores reais e seus correspondentes valores codificados por variável independente.

Tabela 2. Valores reais utilizados no DCCR para produção de extrudados.

Variáveis independentes	Valores codificados				
	-1.414	-1	0	1	+ 1.414
X_1 : Frequência de rotação dos parafusos (min^{-1})	300	358.58	500	641.42	700
X_2 : Umidade de extrusão (%)	14	15.76	20	24.24	26

Um total de 12 ensaios experimentais foi conduzido: pontos fatoriais, $2^2 = 4$; pontos axiais, $2 \times 2 = 4$; pontos centrais, 4. A **Tabela 2** apresenta a matriz do DCCR com valores codificados e reais por ensaio.

Tabela 3. Matriz do DCCR com valores codificados e reais por ensaio experimental.

Ensaio	Valores codificados(Valores reais)	
	Frequência de rotação dos parafusos	Umidade de extrusão
	F (min^{-1})	U (%)
1	-1 (358.58)	-1 (15.76)
2	1 (641.42)	-1 (15.76)
3	-1 (358.58)	1 (24.24)
4	1 (641.42)	1 (24.24)
5	-1.414 (300)	0 (20)
6	1.414 (700)	0 (20)
7	0 (500)	-1.414 (14)
8	0 (500)	1.414 (26)
9	0 (500)	0 (20)
10	0 (500)	0 (20)
11	0 (500)	0 (20)
12	0 (500)	0 (20)

A **Figura 15** ilustra a distribuição dos ensaios experimentais 1 até 9 no plano $F \times U$, para graficar superfícies de resposta como uma função de duas variáveis.

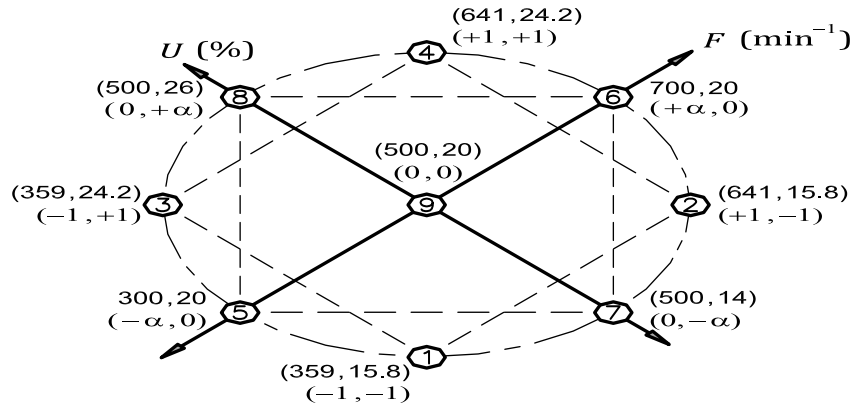


Figura 15. Distribuição de ensaios experimentais em um DCCR 2^2 . Ensaios: 1–4: pontos fatoriais; 5–8: pontos axiais; 9: ponto central.

3.3.14 Análise estatística para o efeito da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão

As respostas do processo e respostas dos extrudados e biscoitos obtidos como resultados do delineamento composto central rotacional 2^2 foram submetidos a uma análise de regressão polinomial de segunda ordem apresentado na equação (23) (BOX et al., 1978).

$$Y_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i}^2 \beta_{ij} X_i X_j \quad (23)$$

Onde Y_j é a resposta (variável dependente de extrusão/propriedades físico-químicas); X_i , $X_i X_i$ e $X_i X_j$ são os efeitos linear, quadrático, e de interação respectivamente, das variáveis de entrada o que influenciam a resposta Y ; β_0 , β_i e β_{ij} são os coeficientes do modelo a ser determinado.

O ajuste dos dados experimentais ao modelo utilizado foi testado pela análise de variância (ANOVA) com o teste de distribuição F a 5 % de probabilidade segundo o qual, um modelo de regressão é significativo quando o valor do teste F calculado é maior em 3 ou mais vezes ao do teste F tabelado e, quanto maior o teste F calculado, mais preditivo é o modelo (BOX e WETZ, 1973).

A adequação do modelo polinomial foi avaliada comparando-se a proporção da variação explicada ($R^2 \geq 0,70$). Nas respostas que não geraram modelo preditivo nem tendência ($R^2 < 0,70$), os resultados foram discutidos mediante comparação de médias analisadas pelo teste de Tukey.

Também foram avaliadas todas as correlações cruzadas entre as respostas de processo e produto entre elas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da matéria prima

A **Tabela 4** descreve os resultados de composição centesimal, fibra detergente neutro, fitatos e taninos condensados dos diferentes genótipos de sorgo avaliados. Eles apresentaram alto teor de fibra, proteína e cinzas em comparação aos cereais comuns, tais como o milho e arroz. Do ponto de vista nutricional, a proteína constitui um dos componentes mais importantes, que variou entre 8,5–10,5 g·100 g⁻¹. É notável ressaltar o conteúdo de cinzas nos grãos que variaram entre 1,27–2,47 g·100 g⁻¹, valores considerados importantes se comparados aos do milho (1,15%). O teor de cinzas de diferentes genótipos de sorgo foi reportado variar entre 1,3–3,4% (MOHARRAM; YOUSSEF, 1995).

Porém há que se destacar o alto teor de fibra nos genótipos marrons (10,57–12,86 g·100 g⁻¹) ($P < 0,05$). Os taninos condensados foram significativamente afetados pela cor do pericarpo como segue: marrom > vermelho > branco ($P < 0,05$). Os de pericarpo branco, não alcançaram 1 mg·g⁻¹, já os de pericarpo vermelho estiveram cerca de 2%. Os de pericarpo marrom claro foram os que apresentaram os valores mais altos. O teor de taninos da BRS305 (13,21 mg·100 g⁻¹) foi superior em mais de duas vezes ao teor dos outros genótipos marrons 9929034 e BR700 (5,05 e 6,54 mg·100 g⁻¹, respectivamente). Evidentemente, a presença de taninos pode ser ou não favorável, dependendo para quem o alimento fosse elaborado. Se desejarmos que este atue como elemento antinutricional utilizar-se-ia aqueles que possuem maiores teores de taninos. Desta forma os materiais extrudados com as diferentes amostras e suas características nutricionais podem ser direcionadas segundo as preferências nutricionais do processador.

Na **Figura 18** observam-se cortes seccional e longitudinal de grãos de sorgo. BR700, BRS308 e BRS305 apresentam maior área do endosperma farináceo. Por sua vez, 9929034 e CMSXS180 expõem maior área do endosperma córneo. Estes fatos estão correlacionados com o teor de proteína como se verifica na **Tabela 4**. Quanto maior endosperma farináceo o grão torna-se menos denso, de fácil resistência à rotura (grãos brandos) e melhores propriedades de absorção de água. Genótipos de sorgo com estas características seriam ideais para fabricação de biscoitos e Waffer.

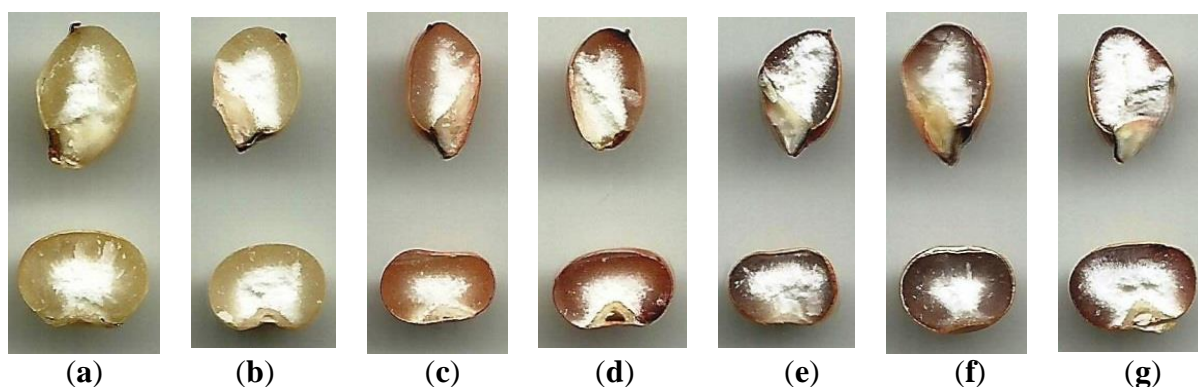


Figura 18. Cortes seccional e longitudinal de grãos de sorgo, genótipos: (a) CMSXS180; (b) 9010032; (c) BRS310; (d) BRS308; (e) BRS305; (f) 9929034; (g) BR700.

Tabela 4. Composição química aproximada, fibra detergente neutro, fitatos e taninos condensados de farinhas integrais de sorgo.

Componente	Pericarpo branco		Pericarpo vermelho		Pericarpo marrom claro		
	CMSXS180	9010032	BRS310	BRS308	BRS305	9929034	BR700
Umidade	^α 13.78 ^{ab} ± 0.13	13.70 ^{ab} ± 0.11	13.96 ^a ± 0.06	14.00 ^a ± 0.16	13.28 ^{bc} ± 0.09	12.79 ^c ± 0.24	11.45 ^d ± 0.12
Cinzas	1.73 ^{bc} ± 0.11	1.83 ^b ± 0.04	1.76 ^{bc} ± 0.05	1.71 ^{bc} ± 0.01	1.59 ^c ± 0.07	2.47 ^a ± 0.04	1.27 ^d ± 0.00
Proteína total	10.01 ^{ab} ± 0.16	10.55 ^a ± 0.20	9.55 ^b ± 0.16	8.72 ^c ± 0.17	9.51 ^b ± 0.02	10.36 ^a ± 0.24	8.57 ^c ± 0.08
Extrato etéreo	3.05 ^{bc} ± 0.08	2.75 ^d ± 0.04	2.96 ^c ± 0.02	3.02 ^{bc} ± 0.07	3.32 ^a ± 0.07	3.18 ^{ab} ± 0.04	2.27 ^e ± 0.00
Carboidratos totais ^β	62.52 ^c ± 0.13	62.34 ^c ± 0.04	62.96 ^{bc} ± 0.46	64.03 ^b ± 0.31	59.44 ^d ± 0.54	59.61 ^d ± 0.04	65.88 ^a ± 0.14
Fibra detergente neutro	8.93 ^c ± 0.12	8.84 ^c ± 0.36	8.83 ^c ± 0.27	8.52 ^c ± 0.10	12.86 ^a ± 0.42	11.58 ^b ± 0.12	10.57 ^b ± 0.34
Fitatos totais ^λ	8.72 ^{ab} ± 0.43	7.36 ^{bc} ± 0.11	7.26 ^{bc} ± 0.45	7.62 ^{ab} ± 0.73	8.02 ^{ab} ± 0.06	9.10 ^a ± 0.29	5.86 ^c ± 0.08
Taninos condensados ^λ	0.64 ^e ± 0.01	0.64 ^e ± 0.01	2.04 ^d ± 0.01	1.98 ^d ± 0.03	13.21 ^a ± 0.08	5.05 ^c ± 0.15	6.54 ^b ± 0.09

^α Média ± desvio padrão de medições em duplicata, expresso em g·100 g⁻¹. As medias com letras diferentes, dentro da mesma fila, diferem uma da outra de acordo ao teste de Tukey (P < 0.05), para comparar farinhas de genótipos de sorgo.

^β Determinado por diferencia

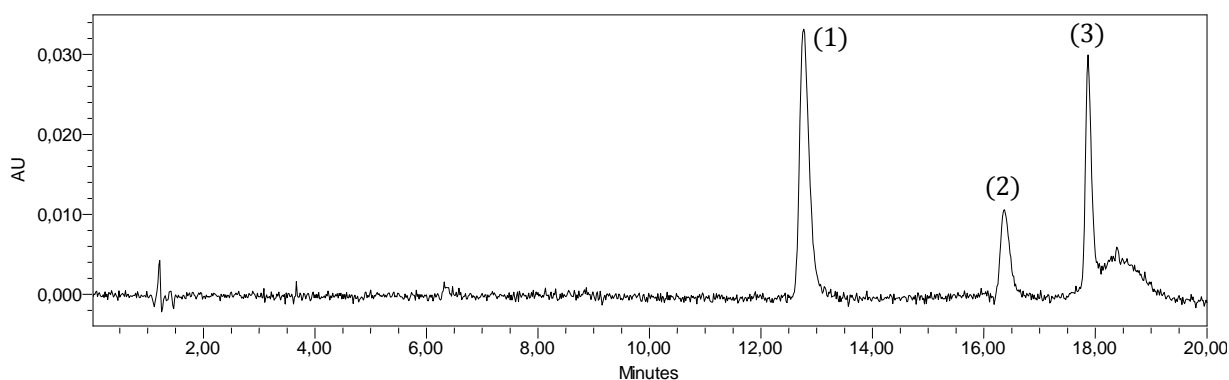
^λ Expresso em mg·g⁻¹

O teor de fitatos não foi influenciado estatisticamente pela cor do pericarpo, exceto para o genótipo BR700 ($P < 0,05$) que mostrou o menor valor ($5,86 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). O teor de fitatos do sorgo é variável e parece ser dependente do cultivar. Vários autores reportaram valores de fitatos na faixa de $2,7\text{--}10 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (DUODU et al., 2003). Todos os genótipos avaliados apresentaram teores de fitatos dentro desta faixa ($5,86\text{--}9,10 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$).

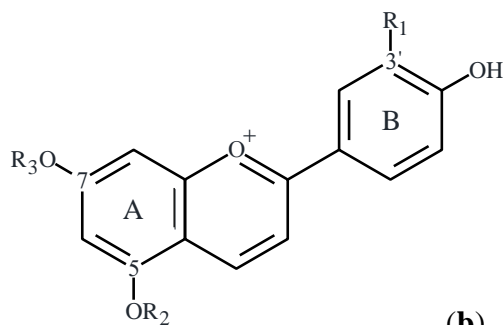
O ácido fítico (ácido hexafosfórico de mio-inositol) geralmente ocorre nas sementes como uma mistura de sais de potássio, magnésio e cálcio (fitinas ou fitatos). O ácido fítico é um excelente agente quelante o que contribui reduzir tanto a biodisponibilidade de minerais traça quanto a digestibilidade proteica. No sorgo, a concentração mais alta de fitatos encontra-se no germe e pericarpo (DUODU et al., 2003). O baixo teor de fitatos no genótipo BR700, possivelmente esteja associado com uma menor área do germe (**Figura 18**).

Os perfis de antocianidinas foram similares para ambos os genótipos (**Figura 19**) apresentando três picos significativos. Em base aos espectros UV apresentados nos **Anexos A-B** e à literatura revisada (AWIKA, 2008), estes compostos foram identificados como: 5-metoxiapigeninidina (1), apigeninidina (2) e 5,7-dimetoxiapigeninidina (3).

As áreas calculadas, por pico e por genótipo foram: 53,84 (1), 17,69 (2) e 28,48% (3) para BRS310; 63,58 (1), 8,24 (2) e 28,18% (3), para BR700. Estes compostos classificados como 3-deoxiantocianinas são conhecidos por serem altamente estáveis a mudanças de pH. Além, foi recentemente demonstrado que estes compostos possuem maior efeito citotóxico contra células cancerosas do que os seus análogos antocianidinas encontrados em frutas, vegetais e alguns cereais.



(a)



(b)

(1): $R_1 = R_3 = \text{H}; R_2 = \text{CH}_3$

(2): $R_1 = R_2 = R_3 = \text{H}$

(3): $R_1 = \text{H}; R_2 = R_3 = \text{CH}_3$

Figura 19. (a) Perfil de antocianinas do sorgo BRS310: (1) 5-metoxiapigeninidina; (2) apigeninidina; (3) 5,7-dimetoxiapigeninidina; (b) Estrutura química das antocianidinas do sorgo.

A **Tabela 5** descreve os resultados de composição em minerais dos diferentes genótipos de sorgo avaliados. No sentido nutricional, os minerais são substâncias inorgânicas necessárias na forma iônica ou como elemento livre, para os processos da vida. Os macrominerais (aqueles necessários em maiores quantidades) incluem o sódio, potássio, cloreto, magnésio, fósforo e cálcio. As quantidades necessárias de todos estes minerais, com exceção do cálcio, podem ser facilmente satisfeitas por uma dieta normal. Os genótipos brancos tiveram os menores teores de cálcio (9,30–11,05 mg·100 g⁻¹) e BRS308 apresentou o maior conteúdo (19,32 mg·100 g⁻¹) (P<0,05).

Os requerimentos para alguns microminerais (minerais traça) foram estabelecidas para o ferro, cobre, zinco, iodo, e flúor. O cobre e zinco são facilmente satisfeitos por diversas fontes alimentares, mas sobredoses deles podem ser tóxicos. Os valores diários de cobre e zinco para um adulto promedio, com idades entre 19–22 anos, são: 3 e 15 mg respectivamente (CAMPBELL e FARELL, 2009). O teor de cobre nos genótipos de sorgo variou entre 0,17 (BR700) a 0,32 (BRS305) mg·100 g⁻¹. O teor de zinco foi menor nos genótipos vermelhos (1,64–1,73 mg·100 g⁻¹) e apresentou maior conteúdo em BRS305 (2,79 mg·100 g⁻¹).

O ferro é importante porque é parte da estrutura da hematina nas hemeproteínas. O ferro encontra-se nos alimentos geralmente sob a forma de Fe(III). Quando o alimento é cozido no canhão do extrusor, a forma liberada do ferro também corresponde a Fe⁺³. Contudo, o ferro deve estar no estado de Fe⁺² para ser absorvido. A redução de Fe⁺³ para Fe⁺² pode ser realizada com ascorbatos ou succinatos. A absorção do ferro é afetada pela solubilidade do ferrocomposto, o ferro das carnes é mais facilmente absorvido do que o ferro dos vegetais, e pela presença de antiácidos no tracto digestivo (CAMPBELL e FARELL, 2009). A saber, o ferro pode formar complexos insolúveis com fosfato ou oxalato, e a presença de antiácidos no tracto digestivo pode diminuir a absorção de ferro.

O teor de ferro nos genótipos de sorgo variou entre 2,20 (BRS308) a 4,21 (BRS305) mg·100 g⁻¹. Os valores diários de ferro para um homem e mulher promedio, com idades entre 19–22 anos, são: 10 e 18 mg respectivamente (CAMPBELL e FARELL, 2009).

Tabela 5. Composição em minerais de farinhas integrais de sorgo.

Elemento	Pericarpo branco		Pericarpo vermelho		Pericarpo marrom claro		
	CMSXS180	9010032	BRS310	BRS308	BRS305	9929034	BR700
Na	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K	^α 326.88 ^{bc} ± 3.03	361.67 ^a ± 2.53	319.70 ^c ± 5.60	325.56 ^{bc} ± 0.04	364.68 ^a ± 4.69	338.16 ^b ± 2.61	287.21 ^d ± 1.86
Mg	139.09 ^c ± 0.08	122.73 ^e ± 0.06	137.41 ^c ± 2.80	129.14 ^d ± 0.18	153.14 ^a ± 0.08	145.66 ^b ± 0.21	121.13 ^e ± 0.56
Ca	11.05 ^d ± 0.49	9.30 ^e ± 0.05	16.44 ^b ± 0.50	19.32 ^a ± 0.51	15.36 ^b ± 0.23	13.16 ^c ± 0.71	15.67 ^b ± 0.20
Mn	1.76 ^b ± 0.03	1.25 ^d ± 0.00	1.55 ^c ± 0.02	1.29 ^d ± 0.00	1.89 ^a ± 0.02	1.81 ^b ± 0.02	1.74 ^b ± 0.02
Fe	3.25 ^c ± 0.09	2.52 ^d ± 0.00	3.44 ^{bc} ± 0.12	2.20 ^e ± 0.02	4.21 ^a ± 0.02	3.57 ^b ± 0.07	2.48 ^d ± 0.05
Zn	2.47 ^b ± 0.02	1.99 ^d ± 0.02	1.73 ^{ef} ± 0.04	1.64 ^f ± 0.01	2.16 ^c ± 0.03	2.79 ^a ± 0.02	1.79 ^e ± 0.03
Cu	0.28 ^b ± 0.01	0.25 ^c ± 0.00	0.26 ^{bc} ± 0.01	0.26 ^{bc} ± 0.00	0.32 ^a ± 0.01	0.24 ^c ± 0.00	0.17 ^d ± 0.00
P	306.80 ^b ± 1.47	286.24 ^c ± 0.22	292.34 ^c ± 5.75	283.58 ^c ± 4.22	285.20 ^c ± 1.11	331.20 ^a ± 1.29	237.59 ^d ± 1.01
Co	NQ ^β	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	ND
Cr	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	ND
Mo	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	ND
Se	0.24 ^a ± 0.01	0.22 ^a ± 0.02	0.20 ^a ± 0.01	0.24 ^a ± 0.02	0.21 ^a ± 0.00	0.21 ^a ± 0.01	0.20 ^a ± 0.01
Pb	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	ND
Al	0.58 ^d ± 0.05	0.27 ^e ± 0.02	1.20 ^b ± 0.02	0.58 ^d ± 0.00	2.16 ^a ± 0.02	0.31 ^e ± 0.02	0.88 ^c ± 0.04

^α Média ± desvio padrão de medições em duplicata, expresso em mg·100 g⁻¹. As medias com letras diferentes, dentro da mesma fila, diferem uma da outra de acordo ao teste de Tukey (P<0,05), para comparar farinhas de genótipos de sorgo.

^β NQ: não quantificado; ND: não detectado.

A **Tabela 6** descreve os resultados de composição em aminoácidos dos diferentes genótipos de sorgo avaliados. As kafirinas do sorgo são ricas em glutamina (GLU) e aminoácidos apolares tais como: leucina (LEU), prolina (PRO) e alanina (ALA); mas esta quase ausente o aminoácido essencial lisina (LYS) (DE MESA-STONESTREET, ALAVI e BEAN, 2010). Os resultados apresentados na **Tabela 6** estão em conformidade com o teor destes aminoácidos para todos os genótipos de sorgo. Em adição, o genótipo BR700 também apresentou elevado teor de glicina (GLY) ($P < 0,05$).

A presença de PRO nas proteínas afeta sua estrutura secundária. Ela encaixa exatamente em uma volta reversa do polipéptido, região onde as mudanças de direção do polipeptídeo são ao redor de 180° . Contudo, uma volta reversa não necessariamente contém PRO (CAMPBELL e FARELL, 2009). Portanto, a presença de PRO, termina um segmento α -helicoidal causando dobramento da cadeia polipeptídica.

Os teores de GLY foram altos para os genótipos 9010032 e BR700. O menor teor foi para BRS310 ($P < 0,05$). Por sua vez, 9010032 e BR700 apresentaram os teores mais baixos de tirosina (TYR) em quantidades similares. Todos os genótipos possuíram quantidades similares de arginina (ARG) e 9929034 apresentou o maior teor de LYS ($P < 0,05$).

Entre genótipos marrons, houve diferença no conteúdo de aminoácidos de 9929034 e BR700 com exceção de histidina (HIS) e ARG. A diferença entre ambos foi evidente no teor de TYR. Por sua vez, GLY, TYR e fenilalanina (PHE) apresentaram teores diferenciados entre os genótipos BRS305 e BR700 ($P < 0,05$).

Entre genótipos brancos, observou-se diferença no teor de aminoácidos, exceto para serina (SER), HIS, ARG, treonina (THR), PRO, isoleucina (ILE) e PHE. A diferença entre ambos foi evidente no teor de TYR. Os genótipos CMSXS180 e BR700 apresentaram teores altos e em quantidades similares de TYR ($P < 0,05$).

Os genótipos vermelhos apresentaram quantidades similares de todos os aminoácidos com exceção de GLY, que foi maior em BRS308 ($P < 0,05$).

Tabela 6. Composição em aminoácidos de farinhas integrais de sorgo.

Aminoácido	Pericarpo branco		Pericarpo vermelho		Pericarpo marrom claro			
	CMSXS180	9010032	BRS310	BRS308	BRS305	9929034	BR700	
Asparagina	ASP	0.56 ^a ± 0.06	0.36 ^b ± 0.04	0.42 ^{ab} ± 0.01	0.39 ^{ab} ± 0.04	0.39 ^{ab} ± 0.06	0.56 ^a ± 0.04	0.37 ^b ± 0.05
Serina	SER	0.41 ^{ab} ± 0.02	0.35 ^{ab} ± 0.02	0.35 ^{ab} ± 0.02	0.42 ^a ± 0.03	0.41 ^{ab} ± 0.03	0.46 ^a ± 0.01	0.30 ^b ± 0.06
Glutamina	GLU	1.81 ^{ab} ± 0.19	1.13 ^c ± 0.07	1.39 ^{bc} ± 0.01	1.03 ^c ± 0.09	1.01 ^c ± 0.10	1.89 ^a ± 0.03	1.09 ^c ± 0.15
Glicina	GLY	0.27 ^b ± 0.01	0.60 ^a ± 0.01	0.23 ^c ± 0.01	0.31 ^b ± 0.01	0.30 ^b ± 0.01	0.29 ^b ± 0.01	0.59 ^a ± 0.01
Histidina	HIS	0.19 ^{ab} ± 0.00	0.22 ^a ± 0.01	0.17 ^b ± 0.01	0.20 ^{ab} ± 0.01	0.21 ^{ab} ± 0.01	0.21 ^{ab} ± 0.00	0.21 ^{ab} ± 0.02
Arginina	ARG	0.30 ^a ± 0.01	0.41 ^a ± 0.03	0.24 ^a ± 0.01	0.33 ^a ± 0.07	0.30 ^a ± 0.01	0.33 ^a ± 0.01	0.38 ^a ± 0.10
Treonina	THR	0.29 ^{ab} ± 0.01	0.24 ^{ab} ± 0.01	0.24 ^{ab} ± 0.01	0.27 ^{ab} ± 0.02	0.26 ^{ab} ± 0.01	0.31 ^a ± 0.01	0.22 ^b ± 0.04
Alanina	ALA	0.79 ^{ab} ± 0.08	0.55 ^c ± 0.05	0.63 ^{abc} ± 0.02	0.61 ^{abc} ± 0.06	0.59 ^{bc} ± 0.05	0.82 ^a ± 0.00	0.49 ^c ± 0.08
Prolina	PRO	0.70 ^a ± 0.05	0.63 ^{ab} ± 0.04	0.62 ^{ab} ± 0.05	0.65 ^{ab} ± 0.02	0.63 ^{ab} ± 0.04	0.77 ^a ± 0.00	0.52 ^b ± 0.07
Tirosina	TYR	0.36 ^{ab} ± 0.00	0.23 ^{de} ± 0.00	0.32 ^{bc} ± 0.02	0.27 ^{cd} ± 0.02	0.26 ^d ± 0.00	0.39 ^a ± 0.01	0.18 ^e ± 0.01
Valina	VAL	0.43 ^{ab} ± 0.03	0.32 ^c ± 0.03	0.34 ^{abc} ± 0.03	0.35 ^{abc} ± 0.02	0.34 ^{bc} ± 0.02	0.44 ^a ± 0.02	0.30 ^c ± 0.02
Lisina	LYS	0.14 ^b ± 0.01	0.05 ^c ± 0.01	0.09 ^{bc} ± 0.00	0.09 ^{bc} ± 0.01	0.11 ^{bc} ± 0.02	0.27 ^a ± 0.03	0.05 ^c ± 0.01
Isoleucina	ILE	0.34 ^a ± 0.03	0.30 ^{ab} ± 0.02	0.28 ^{ab} ± 0.02	0.31 ^{ab} ± 0.01	0.29 ^{ab} ± 0.02	0.35 ^a ± 0.00	0.25 ^b ± 0.02
Leucina	LEU	1.21 ^a ± 0.10	0.86 ^{bc} ± 0.06	0.99 ^{ab} ± 0.08	0.91 ^{bc} ± 0.08	0.86 ^{bc} ± 0.04	1.23 ^a ± 0.01	0.71 ^c ± 0.06
Fenilalanina	PHE	0.50 ^a ± 0.01	0.45 ^{ab} ± 0.04	0.46 ^{ab} ± 0.05	0.53 ^a ± 0.04	0.54 ^a ± 0.01	0.52 ^a ± 0.01	0.36 ^b ± 0.04

^α Média ± desvio padrão de medições em duplicata, expresso em g·100 g⁻¹. As medias com letras diferentes, dentro da mesma fila, diferem uma da outra de acordo ao teste de Tukey (P < 0.05), para comparar farinhas de genótipos de sorgo.

4.2 Distribuição do tamanho de partícula

A distribuição do tamanho das partículas depende do processo de moagem e afeta a expansão e propriedades mecânicas dos extrudados (CARVALHO e ASCHERI, 1999). Quando o processo de moagem é operado em condições constantes, as variações de dissociação entre as partes botânicas do grão integral são dependentes da capacidade de separação da camada periféricas entre a aleurona e o endosperma (PEYRON et al., 2002a). A adesão célula-célula na interface endosperma-aleurona foi reportado estar relacionado com o grau de ligações cruzadas de cadeias de arabinosilano (PEYRON et al., 2002b). Outro fator associado com as propriedades mecânicas do grão de sorgo pode estar relacionado com a distribuição das proteínas do endosperma: kafirins e glutelinas. Sullins e Rooney (1975) relataram uma maior distribuição proteica na região periférica do que na região farinácea, quando diminui a proporção amilopectina/amilose.

A distribuição do tamanho de partículas das farinhas de sorgo (Figura 20) mostraram diferenças recíprocas em quantidades de frações finas e grossas para os genótipos brancos e marrons ($P < 0,05$).

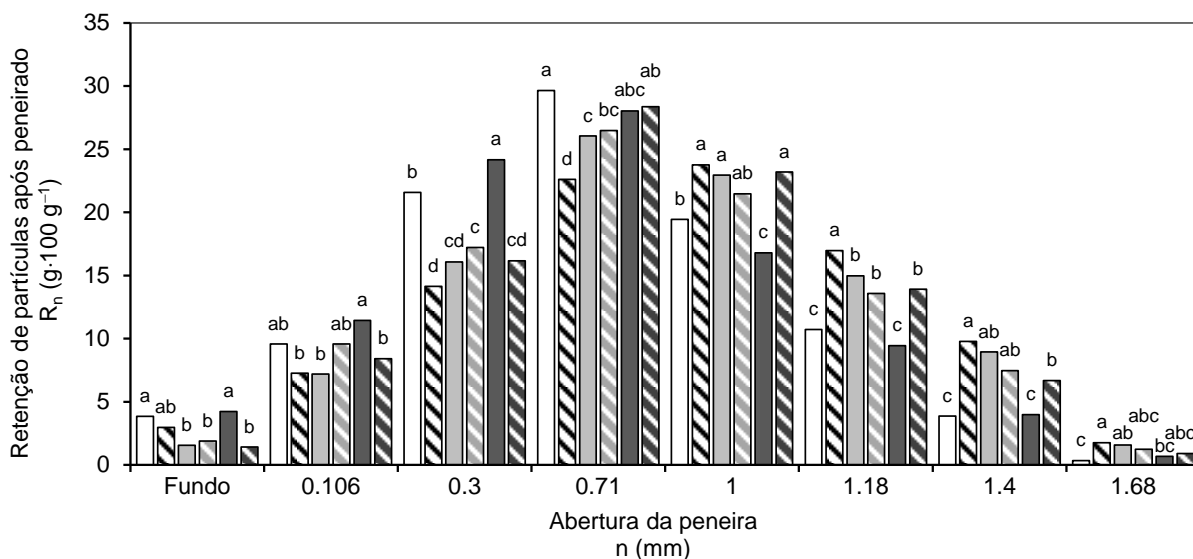


Figura 20. Distribuição do tamanho de partículas de farinhas de sorgo integral: (□) CMSXS180; (■) 9010032; (▒) BRS310; (▓) BRS308; (■) BRS305; (▨) 9929034. Colunas construídas com dados do Anexo B; colunas com letras de script diferentes, dentro de uma abertura de malha igual, diferem umas das outras de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

Nos genótipos brancos, este fato provavelmente esteja relacionado a valores recíprocos no teor de gordura e fitatos ($P < 0,05$) (Tabela 4), mesmo assim ao endosperma periférico diferenciado e menor espessura de pericarpo em 9010032, como se observa na Figura 21a, b.

Ao contrário dos grãos de sorgo de pericarpo fino, os de pericarpo grosso contêm grânulos de amido no mesocarpo (DYKES e ROONEY, 2006), que diminuem a resistência das camadas periféricas do farelo. Consequentemente, grãos com pericarpo finos são mais difíceis de decorticar, exigindo 1,5 a 2 vezes mais tempo do que aqueles de pericarpo grosso (EARP et al., 2004).

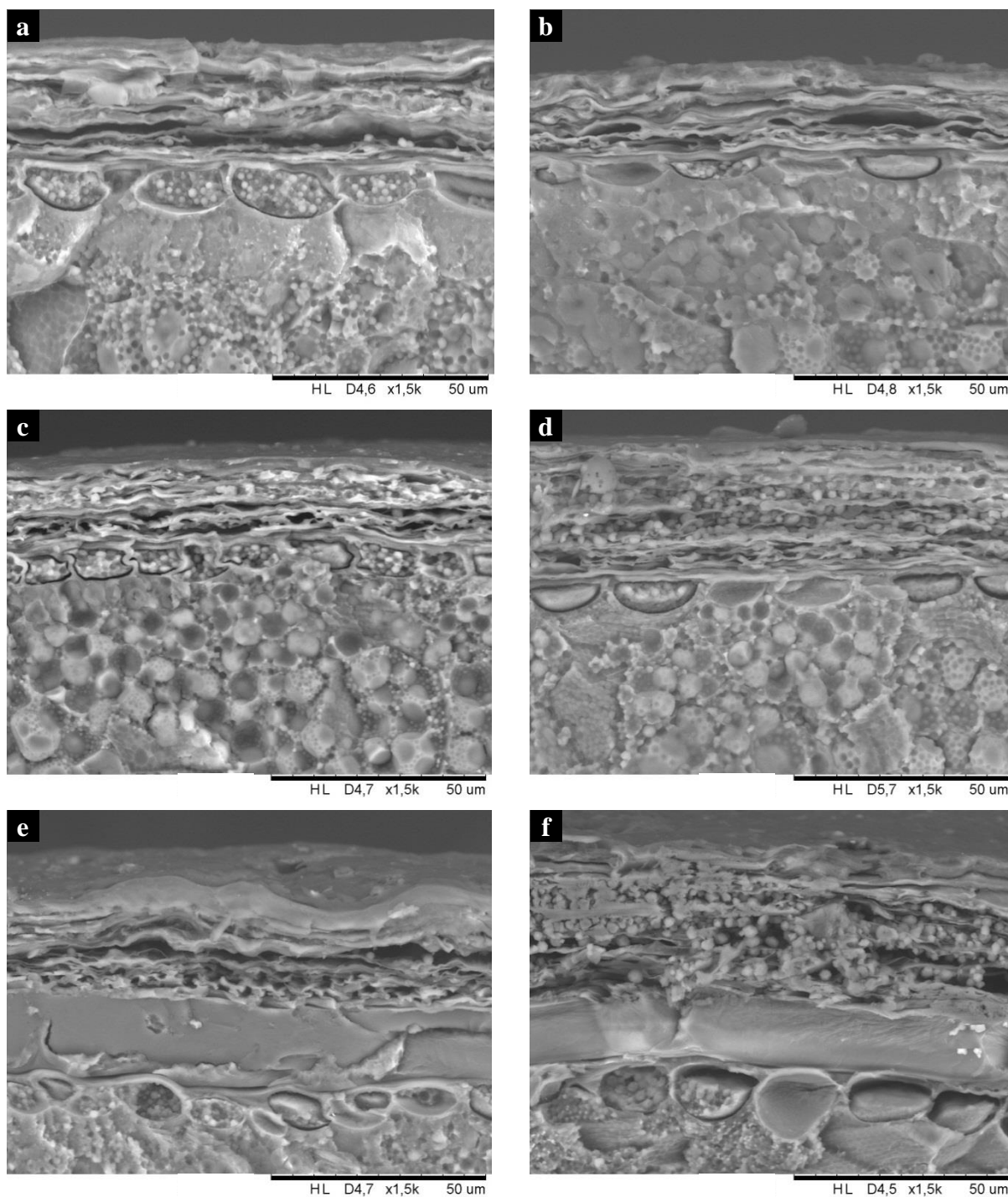


Figura 21. Estrutura do pericarpo de genótipos de sorgo na mesma ampliação (1500x), (a) CMSXS180, (b) 9010032, (c) BRS310, (d) BRS308, (e) BRS305 e (f) 9929034.

As diferenças na distribuição do tamanho de partículas dos genótipos marrons poderiam estar associadas com quantidades recíprocas de proteína de tanino, e cinzas ($P < 0,05$) (**Tabela 4**). Parece que níveis elevados de taninos condensados depositados na testa pigmentada dos genótipos marrons (**Figura 21e, f**) ajudam a enfraquecer a camada de aleurona e como resultado são mais fáceis de serem fragmentados. As camadas de aleurona apresentaram células esféricas grossas de tamanho variável em todos os genótipos (**Figura**

21). A aleurona foi reportada ser rica em cinzas (PEYRON et al., 2002b). Um alto teor de cinzas e presença de células maiores na camada de aleurona observada no grão 9929034, pode estar relacionado com sua resistência mecânica relativa. Em genótipos vermelho foi observada distribuição semelhante de partículas ($P < 0,05$) e se observaram semelhanças tanto na espessura do pericarpo quanto na área do endosperma periférico (**Figura 21c, d**).

4.3 Efeito do genótipo de sorgo sob as variáveis dependentes de extrusão

A energia mecânica específica (*EME*) e a pressão na placa frontal (p_f) foram significativamente afetadas pelos genótipos de sorgo ($P < 0,05$). Os resultados são apresentados no **Anexo C**.

4.3.1 Energia mecânica específica

O genótipo BRS305 apresentou maior *EME* ($1512,84 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0,05$) seguido por CMSXS180, 9929034, 9010032, BRS310 e BRS308 (**Figura 22**). Valores mais elevados de *EME* foram apresentados para BRS305 e CMSXS180, o que pode estar relacionado à maior presença de partículas finas ($\leq 0,3 \text{ mm}$) (**Figura 20**).

Em estudos anteriores, observou-se uma relação inversa entre valores de *EME* e o tamanho de partícula, durante o processamento de milho (CARVALHO et al., 2010), cevada (ALTAN et al., 2009; Al-RABADI et al., 2011a) e sorgo (Al-RABADI et al., 2011a). Em contraste, valores mais baixos de *EME* relacionaram-se com frações grosseiras ($\geq 1 \text{ mm}$), como observado em 9929034, 9010032 e os genótipos vermelhos ($P < 0,05$).

Valores de *EME* revelam tanto o grau de conversão do amido quanto transformações de proteínas e fibras (MORARU AND KOKINI, 2003; ZHANG and HOSENEY, 1998).

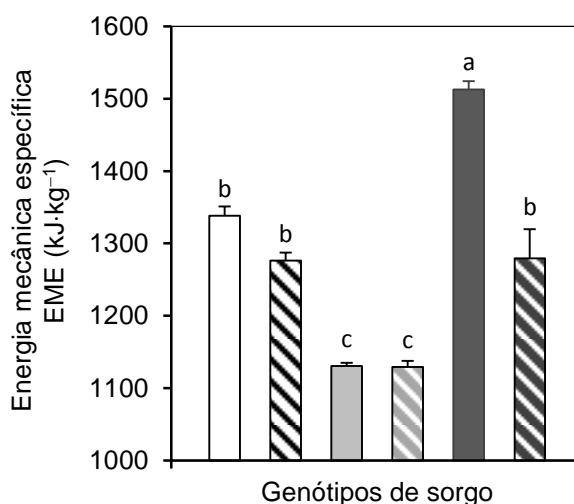


Figura 22. Efeito do genótipo de sorgo sobre a energia mecânica específica: (□) CMSXS180; (▨) 9010032; (▤) BRS310; (▥) BRS308; (■) BRS305; (▩) 9929034. Colunas construídas com dados do **Anexo C**; colunas com letras de script diferentes diferem umas das outras de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

Durante o cozimento por extrusão o material de alimentação é aquecido pela geração de calor por fricção devido às forças de cisalhamento que os parafusos exercem sobre ela. O aumento da temperatura é diretamente proporcional à quantidade de trabalho realizado e, geralmente, deve ser superior à temperatura de fusão/temperatura de transição vítrea dos polímeros. Polímeros cristalinos sofrem certa quantidade de fusão enquanto os polímeros amorfos sofrem transição vítrea. À medida que acontece a fusão, o peso molecular dos polímeros diminui, a viscosidade é reduzida e a resistência ao trabalho mecânico desce (PADMANABHAN, 2008).

A entrada de energia foi significativamente reduzida pela adição de material proteínico durante a extrusão de amidos (DE MESA et al., 2009; GOGOI et al., 1996; ZHU et al., 2010). As transformações proteicas que podem ocorrer incluem desnaturação, associação e coagulação, envolvendo tanto redução quanto oxidação, sendo que a entrada de energia necessária é dependente da estrutura secundária de suas subunidades e/ou estruturas terciárias (SHUKLA, 1996). As kafirinas do sorgo estão distribuídas em corpos proteicos esféricos com uma grande quantidade de ligações cruzadas por ligações dissulfeto, com mais de 30% de resíduos aminoácidos hidrofóbicos (BELTON et al., 2006), os quais contribuem marcadamente na formação de complexos de estruturas oligoméricas. A entrada de energia necessária para a conversão do amido é geralmente uma função do tamanho, forma e arranjo estrutural das regiões semicristalinas presentes nos grânulos de amido (CARVALHO et al., 2010). O tipo de amido influi significativamente na *EME*. Incrementos da *EME* se produziram quando se incrementou o teor de amilose durante o processo de extrusão de amido de milho não modificado (CHAUDHARY et al., 2008) e amido de sorgo (GOMEZ et al., 1988).

Os polissacarídeos lineares como a amilose e as fibras existem em forma helicoidal, enquanto que alguns homoglicanos lineares como a celulose têm estruturas planas em forma de fita. A relativa facilidade com que estes polímeros são mais hábeis em se aproximar e formar cadeias moleculares com um baixo grau de irregularidade permite o estabelecimento de zonas cristalinas. Esta é a razão porque esses polímeros têm uma grande força, grande resistência à tração e alta insolubilidade (BeMILLER e HUBER, 2008) que contribuem na geração de calor por atrito especialmente sob-baixa atividade de água, aumentando tanto o torque e a entrada de energia.

É possível esclarecer as diferenças encontradas nos valores de *EME* dos genótipos de sorgo com base na sua composição química (**Tabela 4**). O genótipo BRS305 apresenta os maiores teores de fibra crua e taninos condensados ($P < 0,05$). Esta fibra é a fração insolúvel dos alimentos, rico em lignina e celulose, o qual não é facilmente fundido durante a extrusão. Portanto, estes compostos podem ter contribuído no ganho de viscosidade na placa frontal do extrusor. Por outro lado, a desnaturação das proteínas durante a extrusão conduz à abertura de estruturas compactas, o que induz interações proteína-polifenol, resultando talvez na formação de complexos proteína-tanino (EMMAMBUX e TAYLOR, 2003; BRENNAN et al., 2011) e/ou complexos proteína-lignina (MONTAÑO-LEYVA et al., 2013). Estas complexações podem contribuir tanto ao aumento da insolubilidade quanto ao incremento do peso molecular dos compostos.

É interessante observar que os dois sorgos de pericarpo branco apresentaram valores semelhantes de *EME* com relação ao genótipo 9929034 de pericarpo marrom. Este fato provavelmente se deva à composição protéica similar que possuem e às quantidades recíprocas de carboidratos/fibra bruta e presença de taninos em 9929034 ($P < 0,05$). Por outro lado, as diferenças nos valores de *EME* entre genótipos marrons poderiam estar relacionada com quantidades recíprocas de proteína, fibra bruta, cinzas e teor de tanino ($P < 0,05$). Os genótipos vermelhos exibiram os valores mais baixos de *EME*, e apresentaram o maior teor de carboidratos ($P < 0,05$).

4.3.2 Pressão na placa frontal.

Compressões fortes ajudam na fusão de polímeros cristalinos. Os elementos de parafuso reverso podem exercer fortes compressões axiais, isso depende da sua localização e espaçamento ao longo do cilindro para a criação da pressão desejável na placa frontal (GOGOI et al., 1996). Da mesma forma, um fluxo uniforme na saída do extrusor está relacionado com o desenho do furo da placa porta-insertos, uma vez que estabelece uma relação não linear entre o fluxo de produto de extrusão e a queda de pressão à saída da placa frontal (CHINNASWAMY e HANNA, 1987; SOKHEY et al., 1997). Os elementos de parafuso reverso também contribuem no preenchimento do canhão ao longo do seu comprimento acumulando uma barreira de massa entre a zona de alimentação e a zona de fusão. Desse modo, é bloqueada a via de escape das bolhas de ar retidas no material fundido, os quais foram libertados a partir dos poros cheios de ar presentes nos espaços vazios inter e intra granulares durante a compactação. Esta barreira evita que sejam afetadas as características de expansão da massa fundida (CISNEROS e KOKINI, 2002).

A configuração de parafusos usada teve dois elementos reversos CF1C com ranhuras axiais localizados no módulo nono e décimo do cilindro (**Figura 11**), o qual contribuiu na formação de níveis de pressão acima de 3 MPa (**Figura 23**).

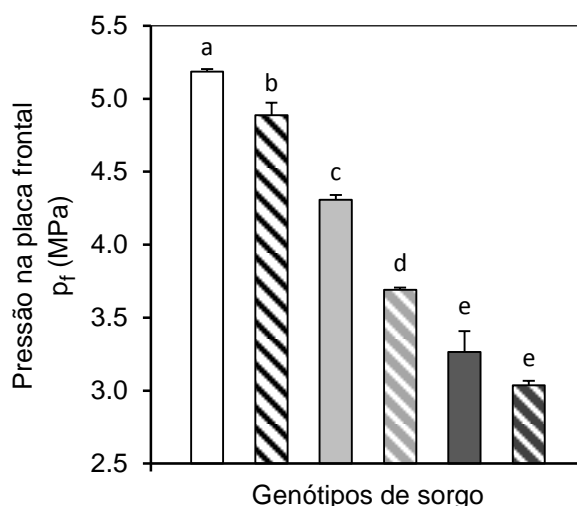


Figura 23. Efeito do genótipo de sorgo sob a pressão na placa frontal: (□) CMSXS180; (▨) 9010032; (▤) BRS310; (▥) BRS308; (▧) BRS305; (▩) 9929034. Colunas construídas com dados do Anexo C; colunas com letras de script diferentes diferem umas das outras de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

O genótipo CMSXS180 gerou o maior valor de p_f (5,19 MPa) e foi diferente dos genótipos vermelhos e 9010032 ($P < 0,05$). A alta pressão gerada por CMSXS180 provavelmente se associa com as suas quantidades elevadas de frações finas. Perfis de alta temperatura e frações finas aumentaram tanto EME quanto p_f , durante o processamento de farinha de sorgo (Al-RABADI et al., 2011a).

Na extrusão dos genótipos brancos e vermelhos observou-se uma relação direta entre p_f e EME (**Figuras 22 e 23**) como era de esperar-se e em concordância com estudos prévios conduzidos com amido de milho não modificado (CHAUDHARY et al., 2008) e farinha de

sorgo (Al-RABADI et al., 2011a). As diferenças de pressão observadas entre pares de genótipos brancos ou vermelhos, talvez esteja associado com maiores proporções de polímeros ramificados na fração de carboidratos dos genótipos 9010032 e BRS308, pois p_f é afetada pelo tipo de amido. Incrementos do teor de amilose durante o processo de extrusão aumentam a viscosidade da massa fundida e em consequência a pressão na placa frontal incrementa-se progressivamente (CHAUDHARY et al., 2008).

Os genótipos marrons geraram as menores pressões na placa frontal, em quantidades similares ($P < 0,05$) e estabeleceram uma relação inversa com os valores de *EME*. Estes resultados podem refletir a presença de amido modificado na fração de seus hidratos de carbono, bem como um efeito lubrificante por elevados teores de lipídeos e baixos teores de umidade nestas farinhas ($P < 0,05$), pois foi necessário um maior fluxo de água para atingir 14% de umidade ($0,08-0,13 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$). A extrusão de amido modificado quando comparado com o processamento de amido não modificado às mesmas condições, resultou em pressões inferiores na placa frontal (CHAUDHARY et al., 2008).

4.4 Efeito do genótipo de sorgo sob as propriedades físico-químicas dos extrudados

A densidade aparente (ρ), o índice de expansão seccional (*IES*), índice de absorção de água (*IAA*) e índice de solubilidade em água (*ISA*) também foram significativamente afetadas pelos genótipos de sorgo ($P < 0,05$). Os resultados são apresentados no **Anexo C**.

4.4.1 Densidade aparente e índice de expansão seccional

Os resultados de ρ e *IES* são apresentados na **Figura 24**. A densidade dos extrudados variou entre $95-186 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. A densidade de um material depende da eficiência de empacotamento das suas moléculas. Densidades maiores são obtidas com empacotamentos mais eficientes. Assim, os polímeros lineares são capazes de se empacotar de forma mais eficiente em comparação com os polímeros ramificados, é assim que tendem a apresentar densidades mais elevadas (BeMILLER e HUBER, 2008). Os sorgos marrons mostraram os maiores valores de densidade ($P < 0,05$), enquanto que os sorgos brancos apresentaram os menores valores (**Figura 24a**). A presença de alto teor de fibra nestes genótipos pode ter contribuído na redução da densidade.

A máxima expansão seccional foi atingida com o extrudado BRS310 (7,89), no entanto não foi estatisticamente diferente do extrudado CMSXS180 (7,61). Os genótipos marrons apresentaram as menores expansões radiais (**Figura 24b**). Baixos teores de carboidratos associado com altos teores de fibra crua bem como uma leve presença de gordura observado nos genótipos marrons parece estar relacionado aos baixos valores de *IES* ($P < 0,05$). A expansão radial é dependente das propriedades elásticas da massa fundida: temperatura e viscosidade aparente, e do desenho do furo da placa porta-insertos: diâmetro e comprimento (BOUZAZA et al., 1996). A massa fundida armazena energia durante seu fluxo através do furo do inserto. Insertos de diâmetro pequeno geram maiores pressões e permite maiores armazenamentos de energia de compressão na massa fundida. Esta energia é liberada em direção radial quando a massa fundida emerge pela placa frontal (ALVAREZ-MARTINEZ, et al., 1988). Por sua vez, pequenas bolhas de ar presentes na massa fundida atuam como núcleos de expansão das células de vapor de água, o que permite a formação da estrutura celular do extrudado expandido (CISNEROS e KOKINI, 2002). Altas caídas de pressões permitem nucleação e crescimento das bolhas de vapor de água (AKDOGAN, 1996; MORARU e KOKINI, 2003).

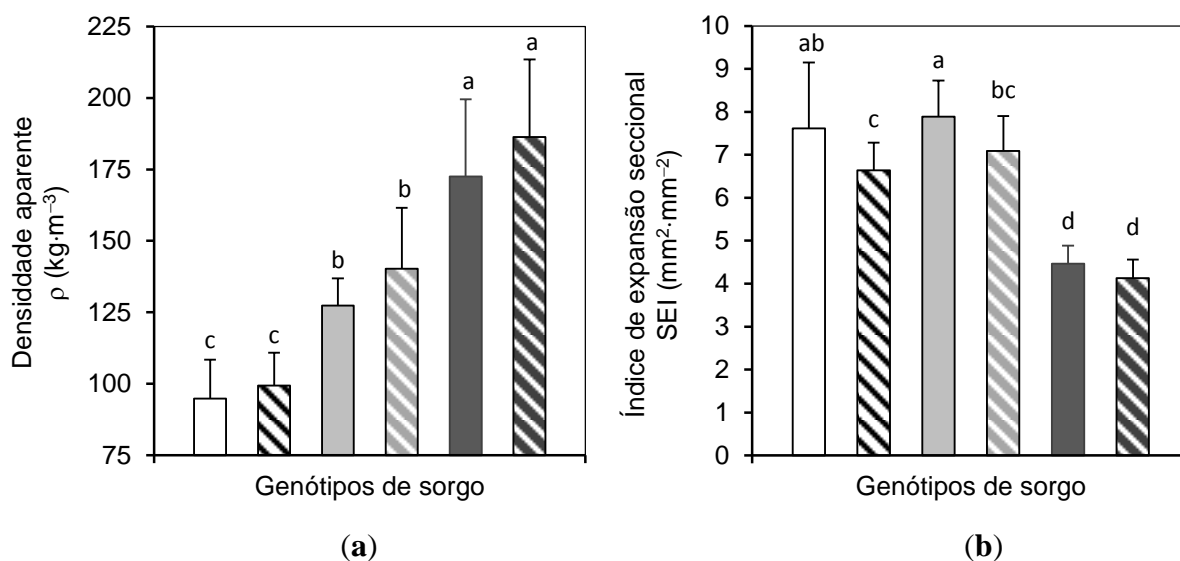


Figura 24. Efeito do genótipo de sorgo sob o índice de expansão seccional e densidade aparente dos extrudados: (□) CMSXS180; (▨) 9010032; (▤) BRS310; (▥) BRS308; (■) BRS305; (▩) 9929034. Colunas construídas com dados do Anexo C; colunas com letras de script diferentes diferem umas das outras de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

A ruptura das bolhas liberta vapor de água, o qual se difunde a través da rede de polímeros ramificados, resultando em uma perda de vapor de água e em uma estrutura tipo esponja, importante para a elasticidade e retenção de gás quanto na definição do tamanho celular/espessura das paredes das células de ar dos produtos extrudados (Shukla, 1998).

Genótipos de sorgo ricos em fibra e com menores proporções de polímeros ramificados na fração de carboidratos pode não contribuir na retenção de vapor de água, e em consequência presenteariam baixas propriedades de expansão.

Os genótipos brancos e vermelhos alcançaram as maiores pressões de fusão (3,7–5,2 MPa) e os maiores valores de *IES* (6–8). Extrudados de sorgo altamente expandidos foram produzidos a partir de grãos de sorgo branco decorticados, de baixo teor de amilose, a uma umidade de extrusão de 17% (GOMEZ et al., 1988). Sugere-se que os genótipos marrons, devido a sua composição química, alto em fibra e lipídeos ($P < 0,05$), resultaram em baixas pressões de fusão e em consequência em baixas propriedades de expansão. A formação do complexo amido-lipídeo durante o processo de extrusão diminui a capacidade de expansão do amido (BHATNAGAR e HANNA, 1994).

4.4.2 Propriedades de hidratação

As propriedades de hidratação desempenham um papel importante nas interações proteína-água e carboidrato-água. O índice de absorção de água (*IAA*) é uma medida do grau de modificação do amido, desnaturação de proteínas e formação de complexos macromoleculares (DOGAN e KARWE, 2003). O índice de solubilidade em água (*ISA*) representa a quantidade de polissacarídeos solúveis libertados das estruturas granulares em excesso de água (AL-RABADI et al., 2011a).

O grau de conversão do amido durante o processo de extrusão foi estudada mediante a técnica do índice de absorção de água (*IAA*) e índice de solubilidade em água (*ISA*). A

absorção de moléculas de água se inicia por fixação delas nas zonas polares dos polímeros, até atingir o seu inchamento. As propriedades de inchamento abrangem um aumento das ligações de hidrogênio entre moléculas de água e grupos hidroxila dos polímeros. No amido, esta propriedade é principalmente o resultado da estrutura molecular da amilopectina, com a amilose atuando como um diluente (SRICHUWONG et al., 2005). A fibra tem um menor potencial de inchamento devido à sua maior insolubilidade (BeMILLER e HUBER, 2008).

Durante o processo de extrusão, as proteínas são afetadas tanto pelo efeito do calor quanto pelo cisalhamento mecânico. O calor provoca desnaturação e agregação de proteínas, enquanto o cisalhamento mecânico causa dissociação/despolimerização (FANG et al., 2013). Estas transformações podem diminuir a superfície da molécula de proteína e a disponibilidade de grupos polares para fixar água. Em proteínas de estrutura muito compacta ocorre dissociação e clivagem de moléculas, sendo possível que ligações peptídicas e cadeias laterais polares anteriormente inativas, atingem a superfície proteica, melhorando as propriedades de hidratação (CHEFTEL et al., 1989).

Os resultados do *IAA* e *ISA* são apresentados na **Figura 25**. Embora os resultados mostrem diferença estatística entre os extrudados de sorgo, os valores de *IAA* não apresentaram diferença substancial. A farinha extrudada da CMSXS180 apresentou baixo *IAA* e alto *ISA* (3,91 g·g⁻¹ e 28,48 g·100 g⁻¹). De acordo com Sriburi et al. (1999), estas características indicariam que o amido sofreu conversão extensiva.

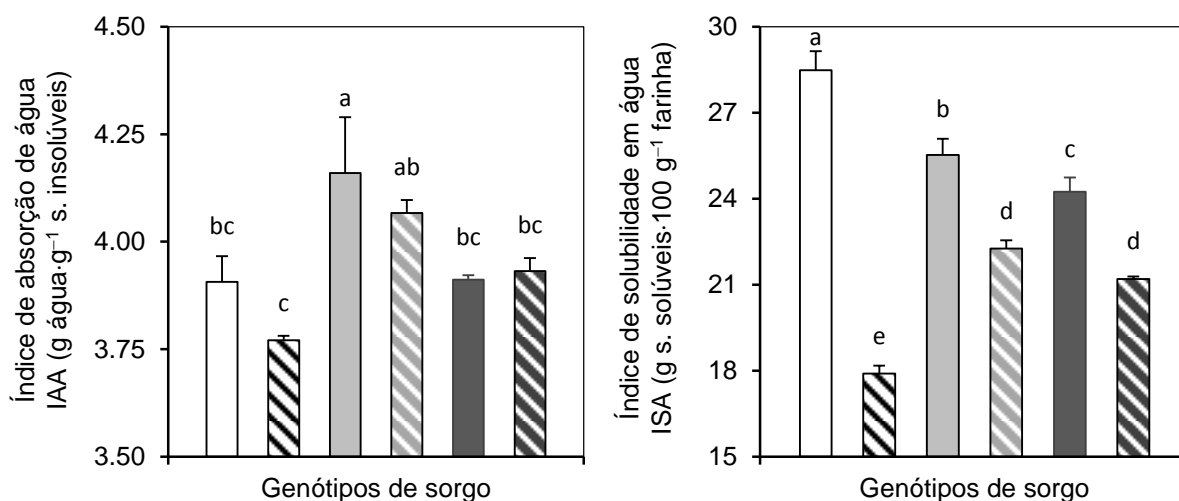


Figura 25. Efeito do genótipo de sorgo sob as propriedades de hidratação dos extrudados: (□) CMSXS180; (▨) 9010032; (■) BRS310; (▤) BRS308; (■) BRS305; (▨) 9929034. Colunas construídas com dados do Anexo C; colunas com letras de script diferentes diferem umas das outras de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).

As farinhas extrudadas de genótipos vermelhos absorveram teores de água por peso de sólidos insolúveis em quantidades similares e foram ligeiramente superiores à absorção de água dos demais genótipos. Por sua vez, BRS310 liberou maior teor de sólidos solúveis do que BRS308 (25,53 e 22,27 g·100 g⁻¹, respectivamente). Estes resultados poderiam indicar que os genótipos vermelhos sofreram pouca conversão do amido, o que se correlaciona com valores baixos de *EME* (menor amido quebrado).

Os genótipos marrons produziram farinhas extrudadas com valores *IAA* intermédios. A farinha do genótipo 9929034 foi menos solúvel que BRS305 (21,20 e 24,24 g·100 g⁻¹, respectivamente). Este fato poderia estar influenciado pelo teor de taninos e características intrínsecas do amido, tais como o grau de polímeros ramificados.

As arabinoxilanas presentes no sorgo foram relatadas ser altamente ramificadas, contribuindo à capacidade de retenção de água e capacidade de retenção de gás na massa (NANDINI e SALIMATH, 2001). Outro aspecto pode estar relacionado com alguma transformação de fibras insolúveis a fibras solúveis (RALET et al., 1990).

Estes resultados indicam o uso potencial do genótipo de sorgo BRS310 na formulação de bebidas instantâneas, devido à sua solubilidade a frio. Por sua vez, o genótipo 9929034 pode ser sugerido na produção de cereais matinais integrais, devido à sua capacidade de permanecer menos solúvel após verter líquido, e devido à presença de fibras e antioxidantes, melhorar-se-ia a qualidade nutricional do produto sugerido.

4.5 Efeito dos parâmetros operacionais sob as variáveis dependentes de extrusão

As respostas relacionadas com as variáveis de extrusão: *EME* e p_f são apresentadas no **Anexo D**. Os coeficientes não significativos (**Anexo E**) foram incorporados aos resíduos para o cálculo das análises de variâncias (**Anexo F**). A análise de regressão de *EME* e p_f para a produção de extrudados dos genótipos de sorgo BRS310 e BR700 (**Tabela 7**) indicaram que todos os modelos polinomiais de segunda ordem correlacionaram bem com os dados experimentais ($R^2 > 0.93$) e foram estatisticamente significativos ($P < 0,05$). Não se teve uma boa correlação para a variável de extrusão p_f do processado BR700 ($R^2 = 0,7452$) com $F_{cal} \leq 3(F_{tab})$ (**Anexo F**), sendo por tanto não válido para propósitos preditivos ($P < 0,05$).

Tabela 7. Resultados da análise de regressão para as variáveis dependentes de extrusão, calculado sob os níveis codificados.

Resposta	Genótipo de sorgo	Modelo						R^2
		β_0	β_1	β_{11}	β_2	β_{22}	β_{12}	
<i>EME</i>	BRS310	968.83 +	240.19 <i>F</i>	–	184.10 <i>U</i>	–	44.23 <i>F·U</i>	0.9959
	BR700	1117.39 +	230.49 <i>F</i>	– 13.45 <i>F</i> ²	– 156.50 <i>U</i>	– 17.03 <i>U</i> ²	– 187.69 <i>F·U</i>	0.9571
p_f	BRS310	3.28 –	0.26 <i>F</i>	–	0.78 <i>U</i>	+ 0.20 <i>U</i> ²		0.9321

β_i : coeficientes de regressão; R^2 : coeficiente de determinação; *EME*: energia mecânica específica; p_f : pressão da massa fundida na placa frontal; BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

Os valores calculados de *EME* variaram entre 596–1434 kJ·kg⁻¹ para BRS310 e 757–1597 kJ·kg⁻¹ para BR700. Esta diferença pode atribuir-se ao elevado teor de fibra detergente neutro e taninos condensados complexados com proteínas presentes em BR700, que contribuem para um maior atrito (torsão de polímeros) afetando a viscosidade da massa durante a fusão de polímeros cristalinos/transição vítrea de polímeros amorfos (alteração do peso molecular dos polímeros). Assim, o descenso da viscosidade diminui a resistência ao trabalho mecânico calculado como *EME* (PADMANABHAN, 2008).

Por sua vez, é bem estabelecido que a extrusão de fontes de amido com alto teor de

amilose incrementa a viscosidade da massa fundida na placa frontal do extrusor (LAI; KOKINI, 1990). A água desempenha uma função plastificante durante o processo de extrusão, sendo evidente o descenso da viscosidade com o aumento da taxa de alimentação de água.

Os resultados das análises de regressão (**Tabela 7**) revelaram que a frequência de rotação dos parafusos (F) e a umidade de extrusão (U) tiveram efeitos lineares significativos sob EME e p_f , em ambos os genótipos. F teve efeitos quadráticos significativos sob EME e p_f , em ambos os genótipos. U teve efeitos quadráticos significativos sob EME do processado BR700 e sob p_f do processado BRS310 ($p < 0,05$).

A entrada de energia incrementou-se com um aumento em F em ambos os genótipos. Uma diminuição em U , aumentou a EME de BRS310 como era de se esperar, e diminuiu levemente a EME de BR700. A pressão diminuiu com um aumento em F e U em ambos os genótipos. As superfícies de resposta apresentadas no **Anexo G** ilustram melhor estes fatos.

4.6 Efeito dos parâmetros operacionais sob as propriedades físico-químicas de extrudados de dois genótipos de sorgo

As respostas referentes às propriedades físico-químicas dos extrudados são apresentadas no **Anexo D**: densidade aparente; **Anexo H**: propriedades de expansão; **Anexos L-M**: propriedades mecânicas; **Anexo Q**: propriedades de hidratação e diferença total de cor; **Anexos U-V**: propriedades de pasta.

4.6.1 Densidade aparente e propriedades de expansão

A análise de regressão de ρ , IES , IEL e IEV por genótipo de sorgo (**Tabela 8**) indicaram que todos os modelos polinomiais de segunda ordem correlacionaram bem com os dados experimentais ($R^2 > 0,94$) e foram estatisticamente significativos ($P < 0,05$).

Os valores calculados de ρ variaram entre 128–521 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para BRS310 e 142–574 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para BR700. Em produtos expandidos é desejável densidades baixas dos extrudados. Foram alcançadas as densidades mais baixas em combinações de baixa umidade de extrusão e alta frequência de rotação dos parafusos para ambos os genótipos processados. Em BR700, o efeito da mútua interação de ambas variáveis independentes, contribuiu para um aumento da densidade dos extrudados.

As superfícies de resposta (**Anexo G**) mostraram que a frequência de rotação dos parafusos teve um efeito dominante positivo sob a densidade aparente. A umidade de extrusão afetou negativamente. A maior densidade do extrudado foi obtida com o ensaio E8 para ambos os genótipos ($F = 500 \text{ min}^{-1}$; $U = 26 \%$).

O IES calculado dos extrudados de sorgo variou entre 2,7–6,6 $\text{mm}^2\cdot\text{mm}^{-2}$ para BRS310 e 1,5–7,5 $\text{mm}^2\cdot\text{mm}^{-2}$ para BR700, enquanto IEL variou entre 0,7–1,5 $\text{mm}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mm}\cdot\text{g}^{-1}$ para BRS310 e 0,9–1,9 $\text{mm}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mm}\cdot\text{g}^{-1}$ para BR700. IES e IEL foram estatisticamente afetados por ambas variáveis independentes.

O IEV calculado variou entre 2,2–10,2 $\text{mm}\cdot\text{g}^{-1}/\text{mm}\cdot\text{g}^{-1}$ para BRS310 e 2,1–9,5 $\text{mm}^3\cdot\text{g}^{-1}/\text{mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ para BR700. A menor expansão seccional dos extrudados foi obtida com os ensaios E4 ($F = 649 \text{ min}^{-1}$; $U = 24,2 \%$) para BRS310 e E8 ($F = 500 \text{ min}^{-1}$; $U = 26 \%$) para BR700.

Tabela 8. Resultados da análise de regressão para a densidade aparente e propriedades de expansão, calculado sob os níveis codificados.

Resposta	Genótipo de sorgo	Modelo						R^2
		β_0	β_1	β_{11}	β_2	β_{22}	β_{12}	
ρ	BRS310	339.22 -	48.75 F		+ 133.80 U			0.9888
	BR700	235.44 -	19.35 F		+ 161.67 U +	67.11 U^2 -	38.53 $F \cdot U$	0.9869
IES	BRS310	3.83 -	0.20 F		- 1.26 U +	0.44 U^2		0.9922
	BR700	3.29 -	0.84 F +	0.36 F^2 -	1.62 U +	0.15 U^2 +	0.62 $F \cdot U$	0.9616
IEL	BRS310	0.95 +	0.21 F		- 0.23 U +	0.09 U^2 -	0.09 $F \cdot U$	0.9582
	BR700	1.66 +	0.35 F -	0.10 F^2 -	0.12 U			0.9410
IEV	BRS310	3.68 +	0.69 F		- 2.40 U +	1.13 U^2 -	0.55 $F \cdot U$	0.9660
	BR700	5.43			- 2.82 U		+ 0.46 $F \cdot U$	0.9848

β_i : coeficientes de regressão; R^2 : coeficiente de determinação; ρ : densidade aparente; IES : índice de expansão seccional; IEL : índice de expansão longitudinal; IEV : índice de expansão volumétrica. BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

Os resultados da análises de regressão (**Tabela 8**) revelaram que a frequência de rotação dos parafusos (F) e a unidade de extrusão (U) tiveram efeitos lineares significativos sob ρ e as propriedades de expansão, em ambos os genótipos, com exceção de IEV onde apenas foi afetado por U . F teve efeitos quadráticos significativos sob IES e IEL , para BR700. U não teve efeitos quadráticos significativos sob ρ do processado BR310 e sob IEL e IEV do processado BR700. A interação de variáveis $F \times U$ não afetou significativamente a ρ e IES de BRS310 e IEL de BR700 ($P < 0,05$).

A densidade incrementou-se com um aumento em U e uma diminuição em F para ambos os genótipos. IES diminuiu com um aumento em F e U em ambos os genótipos. IEL e IEV de BRS310 aumentaram com um aumento em F e uma diminuição em U , como era de se esperar. IEV diminuiu com um aumento em U . As superfícies de resposta apresentadas no **Anexo G** ilustram melhor estes fatos.

O fenômeno de expansão tem sido relacionado com as propriedades elásticas (IES) e propriedades viscosas (IEL) da massa fundida. Os maiores valores de EME (massas fundidas de alta viscosidade) foram obtidas com o ensaio E2 ($F = 641 \text{ min}^{-1}$; $U = 15,8 \%$), o que se confirma com o maior valor de IEL e o menor IEV calculado para este ensaio (**Anexo H**).

4.6.2 Propriedades mecânicas dos extrudados

Um produto extrudado expandido é um material poroso, onde os espaços vazios são denominados células de ar. A distribuição do tamanho das células, sua organização e espessura da parede celular determinam as propriedades mecânicas e sensoriais do extrudado. A força de ruptura das células de ar é uma medida da resistência da parede celular e tem sido bem estabelecida correlacionar com o IES , indicando que o aumento no tamanho dos poros, juntamente com uma diminuição da espessura da parede celular resulta em extrudados de estrutura fraca (BOUVIER, 1997; DOGAN e KARWE, 2003).

A análise de regressão das propriedades mecânicas por genótipo de sorgo (**Tabela 9**) indicaram que todos os modelos polinomiais de segunda ordem correlacionaram bem com os dados experimentais ($R^2 > 0.95$) com exceção para F_c de BRS310 ($R^2 > 0.81$). F_c de BR700

não teve uma boa correlação ($R^2 = 0,5371$) com $F_{cal} \leq 3(F_{tab})$ (Anexo O). W_c apenas teve coeficientes lineares.

Tabela 9. Resultados da análise de regressão para as propriedades mecânicas dos produtos, calculado sob os níveis codificados.

Resposta	Genótipo de sorgo	Modelo						R^2
		β_0	β_1	β_{11}	β_2	β_{22}	β_{12}	
N_{sr}	BRS310	0.20 +	0.05 F	–	0.19 U +	0.10 U^2 –	0.06 $F \cdot U$	0.9687
	BR700	0.49 +	0.06 F	–	0.35 U +	0.07 U^2		0.9706
F_{sr}	BRS310	0.23 –	0.07 F		+ 0.21 U +	0.04 U^2 –	0.05 $F \cdot U$	0.9761
	BR700	0.02 –	0.01 F +	0.00 F^2 +	0.06 U +	0.04 U^2 –	0.02 $F \cdot U$	0.9865
F_c	BRS310	0.17		–	0.02 U +	0.01 U^2		0.8196
W_c	BRS310	1.06 –	0.20 F		+ 0.55 U			0.9545
	BR700	0.25 –	0.04 F		+ 0.24 U +	0.11 U^2 –	0.07 $F \cdot U$	0.9746

β_i : coeficientes de regressão; R^2 : coeficiente de determinação; N_{sr} : frequência de rupturas estruturais; F_{sr} : média da força específica de rupturas estruturais; F_c : média da força de compressão; W_c : trabalho de crocância. BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

Os valores calculados de N_{sr} variaram entre 0,09–0,73 N·mm⁻¹ para BRS310 e 0,16–1,10 N·mm⁻¹ para BR700. O F_{sr} calculado dos extrudados de sorgo variou entre 0,03–0,66 N para BRS310 e 0,01–0,18 N para BR700, enquanto F_c variou entre 0,16–0,21 N para BRS310 e 0,09–0,12 N para BR700. W_c calculado variou entre 0,30–2,06 N·mm para BRS310 e 0,10–0,82 N·mm para BR700. As menores frequências de rupturas estruturais foram obtidas com os ensaios E3 ($F = 641 \text{ min}^{-1}$; $U = 24,2 \%$) e E8 ($F = 500 \text{ min}^{-1}$; $U = 26 \%$) que correlacionaram com os maiores valores de força específica de rupturas estruturais F_{sr} para ambos os genótipos. Não obstante houve uma diferença no trabalho de crocância dos extrudados, que foram maiores no ensaio E3 de BRS310 e E8 de BR700.

4.6.3 Propriedades de hidratação e diferença total de cor

O índice de solubilidade (ISA) avalia a quantidade de sólidos solúveis, que se relaciona com o grau de dextrinização do amido. As interações moleculares entre o amido degradado e componentes proteicos e lipídicos podem levar a um aumento do peso molecular, podendo diminuir a solubilidade, e assim o ISA (DOGAN e KARWE, 2003). O amido encontra-se em diferentes estados no extrudado (cru, gelatinizado ou dextrinizado), portanto, alguns grânulos podem estar parcialmente processados, enquanto alguns podem estar sobreprocessado ou dextrinizado (GOMEZ et al., 1988). Este fato foi comprovado pela ampla faixa de valores de ISA que variou entre 7,6–20,8 g·g⁻¹ para BRS310 e 17,9–45,2 g·g⁻¹ para BR700 (Anexo Q). A menor conversão do amido nos extrudados foi obtida com os ensaios E5 ($F = 300 \text{ min}^{-1}$; $U = 20 \%$) para BRS310 e E3 ($F = 359 \text{ min}^{-1}$; $U = 24,2 \%$) para BR700.

O índice de absorção de água (IAA) depende da disponibilidade dos grupos hidrofílicos e da capacidade de formação de gel das macromoléculas de amilopectina e amido. O IAA calculado dos extrudados de sorgo variou entre 3,6–4,8 g·g⁻¹ para BRS310 e 3,5–4,8

$g \cdot g^{-1}$ para BR700 (**Anexo Q**). *IAA* e *ISA* foram estatisticamente afetados por ambas variáveis independentes. Os coeficientes de determinação para *ISA* e *IAA* (**Anexo R**) foram altamente significativos ($R^2 > 0,90$) (**Tabela 10**), onde os resultados da análises de regressão revelaram que *F* e *U* tiveram efeitos lineares significativos sob *ISA* e *IAA*, com exceção dos valores de *IAA* da BRS310 que apenas foi afetado por *F*. Efeitos quadráticos significativos sob *IAA* apenas apresentou BRS310. *F* teve efeitos quadráticos sob *ISA* da BR700 e *U* teve efeitos quadráticos significativos sob *ISA* do processado BR310. A interação de variáveis $F \times U$ unicamente afetou os valores de *IES* para ambos os genótipos ($P < 0,05$).

As superfícies de resposta apresentadas no **Anexo T** mostraram que *IAA* incrementa-se com uma diminuição em *F* e *U* para o genótipo BRS310. *IAA* da BR700 incrementa-se com uma diminuição em *F* e um aumento em *U*. As variáveis independentes foram competitivas entre si sob os valores de *ISA*, incrementa-se com um aumento em *F* e uma diminuição em *U*.

Tabela 10. Resultados da análise de regressão para as propriedades de hidratação e diferença total de cor, calculado sob os níveis codificados.

Resposta	Genótipo de sorgo	Modelo						R^2	
		β_0	β_1	β_{11}	β_2	β_{22}	β_{12}		
<i>IAA</i>	BRS310	4.72 -	0.18 <i>F</i> -	0.23 F^2	-	0.48 U^2		0.9054	
	BR700	4.22 -	0.17 <i>F</i>		+	0.39 <i>U</i>		0.9134	
<i>ISA</i>	BRS310	12.18 +	2.42 <i>F</i>		-	3.65 <i>U</i> +	1.26 U^2 -	0.76 <i>F</i> · <i>U</i>	0.9600
	BR700	30.18 +	5.90 <i>F</i> +	1.40 F^2 -		7.63 <i>U</i>	-	0.91 <i>F</i> · <i>U</i>	0.9688
ΔE	BR700	8.78 +	0.85 <i>F</i>		-	0.67 <i>U</i>		0.8453	

β_i : coeficientes de regressão; R^2 : coeficiente de determinação; *IAA*: índice de absorção de água; *ISA*: índice de solubilidade em água; ΔE : diferença total da cor; BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

4.6.4 Propriedades de pasta

A análise de regressão das propriedades de pasta dos extrudados dos genótipos de sorgo BRS310 e BR700 (**Tabela 11**) indicaram que todos os modelos polinomiais de segunda ordem correlacionaram bem com os dados experimentais ($R^2 > 0,93$) com exceção da resposta V_{ini} da BR310 com $R^2 = 0,7949$ ($P < 0,05$). Não se teve uma boa correlação para a V_{ini} da BR700 ($R^2 = 0,7228$) com $F_{cal} \leq 3(F_{tab})$ (**Anexo X**), sendo por tanto não válido para propósitos preditivos ($P < 0,05$).

Os resultados da análises de regressão (**Tabela 11**) revelaram que *F* e *U* tiveram efeitos lineares significativos sob todas as propriedades de pasta, em ambos os genótipos, e foram competitivas entre se. *F* teve efeitos quadráticos significativos apenas em BR700 e nas respostas V_{ini} , V_{max} , V_{fin} e *QV*. *U* também apresentou efeitos quadráticos significativos sob as respostas com exceção de V_{min} de BRS310 e *TR* do processado BR700 ($P < 0,05$).

As superfícies de resposta apresentadas no **Anexo Z** revelam que todas as propriedades de pasta avaliadas incrementam-se com uma diminuição em *F* e um aumento em *U*. Quanto maior a interação de ambas variáveis independentes menor o incremento das propriedades de pasta V_{ini} , V_{max} , *QV* e *TR* do processado BR700.

Tabela 11. Resultados da análise de regressão para as propriedades de pasta, calculado sob os níveis codificados.

Resposta	Genótipo de sorgo	Modelo						R^2
		β_0	β_1	β_{11}	β_2	β_{22}	β_{12}	
V_{ini}	BR700	110.50	- 26.56 F	+ 23.44 F^2	+ 58.13 U	+ 34.56 U^2	- 12.13 $F \cdot U$	0.9783
V_{max}	BR700	155.75	- 37.27 F	+ 20.31 F^2	+ 80.66 U	+ 34.69 U^2	- 13.88 $F \cdot U$	0.9804
V_{min}	BRS310	98.13	- 16.05 F		+ 21.54 U			0.7949
V_{fin}	BRS310	189.75	- 25.11 F		+ 54.06 U	- 11.16 U^2		0.9745
	BR700	94.00	- 10.67 F	+ 10.16 F^2	+ 35.47 U	+ 5.53 U^2		0.9329
QV	BR700	116.25	- 34.47 F	+ 13.75 F^2	+ 66.88 U	+ 34.25 U^2	- 23.75 $F \cdot U$	0.9907
TR	BRS310	85.63	- 9.06 F		+ 32.52 U	- 3.19 U^2		0.9904
	BR700	60.13	- 7.87 F		+ 21.68 U		- 6.88 $F \cdot U$	0.9828

β_i : coeficientes de regressão; R^2 : coeficiente de determinação; V_{ini} : viscosidade inicial; V_{max} : viscosidade máxima; V_{min} : viscosidade mínima; V_{fin} : viscosidade final; QV : quebrada viscosidade; TR : tendência à retrogradação; BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

V_{fin} variou entre 93,5–250 cP para BRS310 e 55–151,5 cP para BR700. (**Anexo U**), que correspondem aos ensaios E7 e E3 da BRS310 (500 $\text{min}^{-1}/14\%$ U e 359 $\text{min}^{-1}/24,2\%$ U) e aos ensaios E2 e E3 da BR700 (641 $\text{min}^{-1}/15,8\%$ U e 359 $\text{min}^{-1}/24,2\%$ U).

Dentro das condições experimentais, um aumento na rotação dos parafusos diminuiu moderadamente a V_{fin} , sendo muito marcada essa diminuição com baixas umidades de extrusão.

A tendência à retrogradação (TR) variou de 34 a 128,5 cP para BRS310 que corresponde aos ensaios E7 e E8 (500 $\text{min}^{-1}/14\%$ U e 500 $\text{min}^{-1}/26\%$ U, respectivamente). O processado BR700 teve valores de TR calculados entre 33 a 99 cP. Dentro das condições experimentais, um aumento na rotação dos parafusos diminuiu levemente TR , sendo muito marcada essa diminuição com baixas umidades de extrusão.

4.6.5 Propriedades mecânicas dos biscoitos

A dureza, a máxima força para quebrar o biscoito formulado com farinha extrudada da BR700, variou entre 14,8–46,4 N. A rotação dos parafusos afetou fortemente a dureza dos biscoitos. Farinhas obtidas com alto cisalhamento mecânico produziram biscoitos mais duros. A umidade de processamento quase não teve influencia na dureza dos biscoitos, como se observa na superfície de resposta do **Anexo P**.

A análise de regressão da dureza dos biscoitos produzidos com farinha extrudada do genótipo de sorgo BR700, apresentou um modelo polinomial de primeira ordem com um coeficiente de determinação $R^2 = 0.9042$.

$$F_{max} = 31,12 + 8,19 F - 4,65 U - 2,90 F \times U$$

5 CONCLUSÕES

A extrusão de diferentes genótipos de sorgo sob as mesmas condições de processamento, resultaram num efeito significativo sobre as variáveis dependentes (EME e pressão na matriz) e nas propriedades físico-químicas (densidade aparente, IES, IAA e ISA). Composições químicas diferentes entre genótipos no sorgo podem afetar notavelmente as condições de extrusão.

O maior resultado de EME foi evidenciado no genótipo BRS305. Uma relação inversa foi observada entre pressão e densidade. Genótipos de cor marrão geraram menor pressão e valores de expansão seccionais (IES).

O genótipo BRS310 alcançou o maior IES e valores IAA, correlacionados com a baixa das EME e de pressão intermediária.

O genótipo CMSXS180 provocou alto IES e baixo ISA correlacionados com alta EME e pressão.

Este estudo contribuiu para a compreensão do efeito da fibra e de taninos presentes em genótipos de sorgo no comportamento durante a extrusão de farinhas integrais.

As melhores farinhas extrudadas para desenvolver biscoitos foram caracterizadas por extrudados com expansão mínima, máxima densidade e leve conversão do amido. Os biscoitos processados com essas farinhas apresentaram baixa dureza. Estas propriedades desejadas correlacionaram-se com processos de baixa *EME*, os que foram obtidos combinando valores baixos de *F* e valores intermédios para altos, de *U*. O presente estudo sugere a produção de farinhas extrudadas destinado ao desenvolvimento de biscoitos, com valores de *F* entre 300 min^{-1} – 359 min^{-1} e valores de *U* entre 20% – 24,2%.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKDOGAN, H. Pressure, torque, and energy responses of a twin screw extruder at high moisture contents. *Food Research International*, v. 29, n. 5–6, p. 423–429, 1996.

AL-RABADI, G. J.; TORLEY, P. J.; WILLIAMS, B. A.; BRYDEN, W. L.; GIDLEY, M. J. 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, 2011a.

AL-RABADI, G. J.; TORLEY, P. J.; WILLIAMS, B. A.; BRYDEN, W. L.; GIDLEY, M. J. Effect of extrusion temperature and pre-extrusion particle size on starch digestion kinetics in barley and sorghum grain extrudates. *Animal Feed Science and Technology*, v. 168, n. 3–4, p. 267–279, 2011b.

ALI, N. M. M.; TINAY, A. H. E.; ELKHALIFA, A. E. O.; SALIH, O. A.; YOUSIF, N. E. Effect of alkaline pretreatment and cooking on protein fractions of a high-tannin sorghum cultivar. *Food Chemistry*, v. 114, n. 2, p. 649–651, 2009.

ALTAN, A.; McCARTHY, K. L.; MASKAN, M. Effect of screw configuration and raw material on some properties of barley extrudates. *Journal of Food Engineering*, v. 92; n. 4, p. 377–382, 2009.

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.; PFEIFER, V. F.; GRIFFIN, E. L. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*, v. 14, n. 1, p. 4–12, 1969.

ANDERSON, J. C.; JONES, B. D. Principal factor analysis of extruded sorghum and peanut bar changes during accelerated shelf-life studies. *Journal of Food Science*, v. 64, n. 6, p. 1059–1063, 1999.

ANVISA. AGENCIA NACIONAL DE VIGILANCIA SANITARIA. 2005. <http://www.anvisa.gov.br/legis/index.htm>. Acesso em 9 de Setembro de 2011.

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

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

ARTZ, W. E.; WARREN C. C.; VILLOTA, R. Twin-screw extrusion modification of a corn fiber and cornstarch extruded blend. *Journal of Food Science*, v. 55, p. 746–754, 1990.

ASCHERI, J. L. R.; CARVALHO, C. W. P. Efecto de los parámetros de extrusion,

características de pasta y ttextura de pellets (snacks de tercera generación) producidos a partir de trigo y maíz. *Alimentaria*, v. 35, p.93 – 98, 1997.

AWIKA, J. M. Antioxidant properties of sorghum. PhD. dissertation, Texas A&M University, College Station, TX. 2003.

AWIKA, J.M.; DYKES, L.; GU, L.; ROONEY, L.W.; PRIOR, R.L. Processing of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products alters procyanidin oligomer and polymer distribution and content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. v. 51, p. 5516–5521, 2003.

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

AWIKA, J. M. Behavior of 3-deoxyanthocyanidins in the presence of phenolic copigments. *Food Research International*, v. 41, n. 5, p. 532–538, 2008.

ARRANZ, S.; CALIXTO, F. S. Analysis of polyphenols in cereals may be improved performing acidic hydrolysis: A study in wheat flour and wheat bran and cereals of the diet. *Journal of Cereal Science*. v. 51, n. 3, 313–318, 2010.

BECKER, A.; HILL, S. E.; MITCHELL, J. R. Milling – A further parameter affecting the Rapid Visco Analyser (RVA) profile. *Cereal Chemistry*, v. 78, n. 2, p. 166–172, 2001.

BELTON, P. S.; DELGADILLO, I.; HALFORD, N. G.; SHEWRY, P. R. Kafirin structure and functionality. *Journal of Cereal Science*, v. 44, n. 3, p. 272–286, 2006.

BeMILLER, J. N.; HUBER, K. C. Carbohydrates. In S. Damodaran, K. L. Parkin, O. R. Fennema (Eds.), *Fennema's food chemistry* (4th ed., pp. 75–130). CRC Press, Boca Raton, 2008.

BERRIOS, J. J.; ASCHERI, J. L. R.; LOSSO, J. N. Extrusion processing of dry beans and pulses. In M. Siddiq, M. A. Uebersax (Eds.), *Dry beans and pulses*. (pp. 185–203). John Wiley ; Sons, Iowa, 2013.

BERK, Z. Food process engineering and technology (pp. 333-350). Academic Press, New York, 2009.

BHATNAGAR, S.; HANNA, M. A. Amylose-lipid complex formation during single-screw extrusion of various corn starches. *Cereal chemistry*, v. 71, n. 6, p. 582–587, 1994.

BLESSIN, C. W.; VANETTEN, C. H.; DIMLER, R. J. An examination of anthocyanogens in grain sorghums. *Cereal Chemistry*,v. 40, p. 241–250, 1963.

BOBBIO, F.O.; BOBBIO, P. *Introdução à química de alimentos*. 3ra edição. São Paulo: Varela, 2003. 238 p.

BOUVIER, J. M.; BONNEVILLE, R.; GOUILLEUX, A. Instrumental methods for the measurements of extrudate crispness, *Agrofood-Industry Hi-Tech*, January/February, 16–19, 1997.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. *Statistic for experimenters. An introduction to design, data analysis and model building.* New York: Wiley. 1978. 669 p.

BOX, G.E.P.; WETZ, J. *Criteria for judging adequacy of estimation by approximate response function.* University of Wisconsin. Technical Report, n. 9, 1973.

BOUZAZA, D.; ARHALIASS, A.; BOUVIER, J. M. *Die design and dough expansion in low moisture extrusion-cooking process.* *Journal of Food Engineering*, v. 29, n. 2, p. 139–152, 1996.

BRANDON, M.J.; FOO, L.Y.; PORTER, L.J.; MEREDITH, P. *Proanthocyanidins of barley and sorghum composition as a function of maturity of barley ears.* *Phytochemistry*, v. 21, n. 12, p. 2953–2957, 1982.

BRAVO, L. *Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism and nutritional significance.* *Nutrition Reviews*, v. 56, n. 11, p. 317–333, 1998.

BRENNAN, C.; BRENNAN, M.; DERBYSHIRE, E.; ; TIWARI, B. K. *Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods.* *Trends in Food Science and Technology*, v. 22, n. 10, p. 570–575, 2011.

BURNS, R. E. *Method for estimation of tannin in grain sorghum.* *Agronomy Journal*, v. 63, n. 3, p. 511–512, 1971.

CAI, L.; SHI, Y-G.; RONG, L.; HSIAO, B. S. *Debranching and crystallization of waxy maize starch in relation to enzyme digestibility.* *Carbohydrate Polymers*, v. 81, n. 2, p. 385–393, 2010.

CAMIRE, M. E.; CAMIRE, A. L.; KRUMHAR, K. *Chemical and nutritional changes.* *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 29, p. 35–57, 1990.

CAMPBELL, M. K.; FARELL, S. O. *Biochemistry.* 6th ed. Thomsom. USA. 2009. 814 p.

CARCEA, M.; CUBADDA, R.; ACQUISTUCCI, R. *Physicochemical and rheological characterization of sorghum starch. A Research Note.* *Journal of Food Science*, v. 57, n. 4, p. 1024–1025, 1992

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

CARVALHO, C. W. P.; TAKEITI, C. Y.; ONWULATA, C. I.; PORDESIMO, L. O. *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.

CHANG, Y.K.; HASHIMOTO, J.M.; ACIOLI-MOURA, R.; MARTÍNEZ-FLORES, H.E.; MARTÍNEZ-BUSTOS, F. *Influence of extrusion condition on cassava starch and soybean protein concentrate blends.* *Acta Alimentaria*, Amsterdam, v. 30, n. 2, p. 189-203, 2001.

CHAUDHARY, A. L.; MILER, M.; TORLEY, P. J.; SOPADE, P. A.; HALLEY, P. J. *Amylose content and chemical modification effects on the extrusion of thermoplastic starch from maize.* *Carbohydrate Polymers*, v. 74, n. 4, p. 907–913, 2008.

CHEFTEL, J. C.; CUQ, J. L.; LORIENT, D. Proteínas alimentarias. Bioquímica, propiedades funcionales, valor nutricional, modificaciones químicas (pp. 49-139). Acribia, Spain, 1989.

CHEYNE, A.; BARNES, J.; WILSON, D. I. Extrusion behaviour of cohesive potato starch pastes: I. Rheological characterization. *Journal of Food Engineering*, v. 66, n. 1, p. 1–12, 2005.

CHINNASWAMY, R.; HANNA, M. A. Nozzle dimension effects on the expansion of extrusion cooked corn starch. *Journal of Food Science*, v. 52, n. 6, p. 1746–1747, 1987.

CHINNASWAMY, R.; HANNA, M. A. Relationship between amylose content and extrusion-expansion properties of corn starches. *Cereal Chemistry*, v. 65, p. 138 – 143, 1988.

CISNEROS, F. H.; KOKINI, J. L. A generalized theory linking barrel fill length and air bubble entrapment during extrusion of starch. *Journal of Food Engineering*, v. 51, n. 2, p. 139–149, 2002.

CLIFFORD, M. N. Anthocyanins—nature, occurrence and dietary burden. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 80, p. 1063–1072, 2000.

CORREIA, I.; NUNES, A.; BARROS, A. S.; DELGADILLO, I. Comparison of the effects induced by different processing methods on sorghum proteins. *Journal of Cereal Science*, v. 51, n. 1, p. 146–151, 2010.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. *Química de alimentos de Fennema*. Tradução Adriano Brandelli ... [et al.]. 4ta ed. Artmed. Porto Alegre: Brasil. 2010, 900 p.

DE MESA, N. J. E.; ALAVI, S.; SINGH, N.; SHI, Y. C.; DOGAN, H.; SANG, Y. Soy protein-fortified expanded extrudates: Baseline study using normal corn starch. *Journal of Food Engineering*, v. 90, n. 2, p. 262–270, 2009.

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. 90–104, 2010.

DE MESA-STONESTREET, N. J.; ALAVI, S.; GWIRTZ, J. Extrusion-enzyme liquefaction as a method for producing sorghum protein concentrates. *Journal of Food Engineering*, v. 108, n. 2, p. 365–375, 2012.

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.

DOCEREVISTA. <http://definicao.com.br/docerevista/biscoitos/>. 2003.

DOGAN, H.; KARWE, M. V. Physicochemical properties of quinoa extrudates. *Food Science and Technology International*, v. n. 2, 101–114, 2003.

DUODU, K. G.; TAYLOR, J. R. N; BELTON, P. S.; HAMAKER, B. R. Factors affecting sorghum protein digestibility. *Journal of Cereal Science*, v. 38, n. 2, p. 117-131, 2003.

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

DYKES, L.; SEITZ, L. M.; ROONEY, W. L.; ROONEY, L. W. Flavonoid composition of red sorghum genotypes. *Food Chemistry*, v. 116, n. 1, p. 313–317, 2009.

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.

EL-DASH, A. A. Application and control of thermoplastic extrusion of cereals for food and industrial uses. In: POMERANZ, Y.; MUNICH, L. *Cereals: a renewable resource, theory and practice*. American Association of Cereal Chemists. Saint Paul: 1981, cap. 10, p.165-216.

EMBRAPA. Cultivo do sorgo. Mercado e comercialização. Embrapa Milho e Sorgo Sistema de Produção 2, 2011. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sorgo/CultivodoSorgo/mercado.htm>>.

EMMAMBUX, N. M.; TAYLOR, J. R. N. Sorghum kafirin interaction with various phenolic compounds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 83, n. 5, p. 402–407, 2003.

FAN, J. T.; 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 and Technology*, v. 31, n. 1, p. 55–65, 1996.

FANG, Y.; ZHANG, B.; WEI, Y.; LI, S. Effects of specific mechanical energy on soy protein aggregation during extrusion process studied by size exclusion chromatography coupled with multi-angle laser light scattering. *Journal of Food Engineering*, v. 115, n. 2, p. 220–225, 2013.

FANNON, J. E.; BEMILLER, J. N. Structure of corn starch paste and granule remnants revealed by low temperature scanning electron microscopy after cryopreparation. *Cereal Chemistry*, v. 69, p. 456–460, 1992.

FAOSTAT (2013). Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Statistics Division 2013. <http://faostat.fao.org/site/567/Desktopdefault.aspx?PageID=567#anchor>, 08 de fevereiro de 2013.

FAPOJUWO, O. O.; MAGA, J. A.; JANSEN, G. R. Effect of extrusion cooking on in vitro protein digestibility of sorghum. *Journal of Food Science*, v. 52, n. 1, p. 218–219, 1987.

FALCONE, R. G.; PHILLIPS, R. D. Effects of feed composition, feed moisture, and barrel temperature on the physical and rheological properties of snack-like products prepared from cowpea and sorghum flours by extrusion. *Journal of Food Science*, v. 53, n. 5, p. 1464–1469, 1988.

FELLOWS, P. J. *Food Processing Technology: principles and practice*. 2 ed. Cambridge: Midway Technology Limited, 2000. 575 p.

GOGOI, B. K.; CHOUDHURY, B. S.; OSWALT, A. J. Effects of location and spacing of reverse screw and kneading element combination during twin-screw extrusion of starchy and proteinaceous blends. *Food Research International*, v. 29, n. 5–6, p. 505–512, 1996.

GOMEZ, M. H.; WANISKA, R. D.; ROONEY, L. W.; LUSAS, E. W. Extrusion-cooking of sorghum containing different amounts of amylose. *Journal of Food Science*, v. 53, n. 6, p. 1818–1822, 1988.

GOUS, F. Tannins and phenols in black sorghum. Ph.D. dissertation, Texas A&M University, College Station, TX, 1989.

GU, L.; KELM, M.; HAMMERSTONE, J. F.; BEECHER, G.; CUNNIGHAM, D.; VANNOZZI, S.; PRIOR, L. Fractionation of polymeric procyanidins from lowbush blueberry and quantification of procyanidins in selected foods with an optimized normal-phase HPLC-MS fluorescent detection method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 50, n. 17, p. 4852–4860, 2002.

GUY, R. Extrusion cooking: Technologies and application. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd. 2002.

HUBER, K. C.; BEMILLER, J. N. Channels of maize and sorghum starch granules. *Carbohydrate Polymers*, v. 41, n. 3, p. 269–276, 2000.

HUY, Y. H. Bakery products, science and technology. Blackwell Publishing, Iowa, USA. 2006. 575 p.

JANSEN, L. P. B. (1978). Twin screw extrusion. Amsterdam: Elsevier.

KRUEGER, C. G.; VESTLING, M. A.; REED, J. D. Matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry of heteropolyflavan-3-ols and glucosylated heteropolyflavans in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 51, p. 538–543, 2003.

LAI, L. S.; KOKINI, J. L. Physicochemical changes and rheological properties of starch during extrusion. *Biotechnology Progress*, v. 7, n. 3, p. 251–266, 1991.

LARREA, M. A.; CHANG, Y. K.; MARTINEZ-BUSTOS, F. Some functional properties of extruded orange pulp and its effect on the quality of cookies. *Lebensmittel-Wissenschaft Technologie*, v. 38, p. 213–220, 2005.

LASZTITY, R. Sorghum proteins. In: *The chemistry of cereal proteins*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, 1996, pp. 227–248.

LIU, R. H. Whole grain phytochemicals and health. *Journal of Cereal Science*, v. 46, n. 3, p. 207–219, 2007.

LOTITO, S. B.; ACTIS-GORETTA, L.; RENART, M. L.; CALIGIURI, M.; REIN, D.; SCHMITZ, H. H.; STEINBERG, F. M.; KEEN, C. L.; FRAGA, C. G. Influence of oligomer chain length on antioxidant activity of procyanidins. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, v. 276, n. 3, p. 945–951, 2000.

MAHASUKHONTHACHAT, K.; SOPADE, P. A.; GIDLEY, M. J. Kinetics of starch digestion and functional properties of twin-screw extruded sorghum. *Journal of Cereal Science*, v. 51, n. 3, p. 392–401, 2010.

MANOHAR, R. S. e RAO, P. H. Effect of Sugars on the Rheological Characteristics of Biscuit Dough and Quality of Biscuits. *Journal of Science and Food Agriculture*, v. 75, p. 383–390, 1997.

MARTELLI, F. G. *Twin screw extruders- A basic understanding*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1983.

MEERA, M. S.; BHASHYAM, M. K.; ALI, S. Z. Effect of heat treatment of sorghum grains on storage stability of flour. *LWT Food Science and Technology*, v. 44, n. 10, 2199–2204, 2011.

MÉNDEZ-ALBORES, A.; VELES-MEDINA, J.; URBINA-ÁLVAREZ, E.; MARTÍNEZ-BUSTOS, F.; MORENO-MARTÍNEZ, E. Effect of citric acid on aflatoxin degradation and on functional and textural properties of extruded sorghum. *Animal Feed Science and Technology*, v. 150, n. 3–4, p. 316–329, 2009.

MERCIER, C.; CANTARELLI, C. *Pasta and Extrusion Cooked Foods: some technological and nutritional aspects*. London: Elsevier, 1986.

MILADINOV, V. D.; HANNA, M. A. Starch esterification by reactive extrusion. *Industrial Crops and Products*, v. 11, n. 1, p. 51–57, 2000.

MOHARRARA, Y. G.; YOUSSEF, A. M. A. Sorghum grain and quality of its edible products. *Food Science and Technology Department Faculty of Agriculture, Alexandria University, Alexandria, Egypt*, 1995.

MONTAÑO-LEYVA, B.; DA SILVA, G. G. D.; GASTALDI, E.; TORRES-CHÁVEZ, P.; GONTARD, N.; ANGELLIER-COUSSY, H. Biocomposites from wheat proteins and fibers: Structure/mechanical properties relationships. *Industrial Crops and Products*, v. 43, p. 545–555, 2013.

MORAES, É. A.; QUEIROZ, V. A. V.; SHAFFERT, R. E.; COSTA, N. M. B.; NELSON, J. D.; RIBEIRO, S. M. R.; MARTINO, H. S. D. In vivo protein quality of new sorghum genotypes for human consumption. *Food Chemistry*, v. 134, n. 3, p. 1549–1555, 2012.

MORARU, C. I.; KOKINI, J. L. Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 2, n. 4, p. 147–165, 2003.

MORRIS, P.C.; BRYCE, J.H. *Cereal biotechnology*. Woodhead Publishing Limited. Cambridge: England. 245 p. 2000.

MUKISA, I. M.; MUYANJA, C. M. B. K.; BYARUHANGA, Y. B.; SCHÜLLER, R. B.; LANGSRUD, T.; NARVHU, J. A. Gamma irradiation of sorghum flour: Effects on microbial inactivation, amylase activity, fermentability, viscosity and starch granule structure. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 81, n. 3, p. 345–351, 2012.

NANDINI, C. D.; SALIMATH, P. V. Structural features of arabinoxylans from sorghum having good roti-making quality. *Food Chemistry*, v. 74, n. 4, p. 417–422, 2001.

NACZK, M.; SHAHIDI, F. Nutritional implications of canola condensed tannins. *Antinutrients and Chemicals in Food: ACS Symposium Series*, v. 662, p. 186–208, 1997.

NIP, W. K.; BURNS, E. E. Pigment characterization in grain sorghum. I. Red varieties. *Cereal Chemistry*, v. 46, p. 490–495, 1969.

NIP, W. K.; BURNS, E. E. Pigment characterization in grain sorghum. II. White varieties. *Cereal Chemistry*, v. 48, p. 74–80, 1971.

PADMANABHAN, B. Understanding the extruder processing zone: the heart of a twin screw extruder. *Plastics, Additives and Compounding*, v. 10, n. 2, p. 30–35, 2008.

PALE, E., KOUDABONAFOS, M., NACRO, M., VANHAELEN, M., VANHAELEN-FASTRE, R., OTTINGER, R. 7-O-methylapigeninidin, an anthocyanidin from *Sorghum caudatum*. *Phytochemistry*, v. 45, n. 5, p. 1091–1092, 1997.

PAREYT, B.; DELCOUR, J. A. The role of wheat flour constituents, sugar, and fat in low moisture cereal based products: a review on sugar-snap cookies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 48, p. 824–839, 2008.

OLAYINKA, O. O.; OLU-OWOLABI, B. I.; ADEBOWALE, K. O. Effect of succinylation on the physicochemical, rheological, thermal and retrogradation properties of red and white sorghum starches. *Food Hydrocolloids*, v. 25, n. 3, p. 515–520, 2011.

PÉREZ, S.; BERTOFT, E. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review, *Starch/Stärke*, v. 62, p. 389–420, 2010.

PEYRON, S.; SURGET, A.; MABILLE, F.; AUTRAN, J. C.; ROUAU X.; ABECASSIS, J. Evaluation of tissue dissociation of durum wheat grain (*Triticum durum* Desf.) generated by the milling process. *Journal of Cereal Science*, v. 36, n. 2, p. 199–208, 2002a.

PEYRON, S.; CHAURAND, M.; ROUAU X.; ABECASSIS, J. Relationship between bran mechanical properties and milling behaviour of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). Influence of tissue thickness and cell wall structure. *Journal of Cereal Science*, v. 36, n. 3, p. 377–386, 2002b.

PIETTA, P.; MINOGGIO, M.; BRAMATI, L. Plant polyphenols: structure, occurrence and bioactivity. *Studies in Natural Products Chemistry*, v. 28, part I, p. 257–312, 2003.

RALET, M. C.; THIBAUT, J. F.; DELLA VALLE, G. Influence of extrusion-cooking on the physico-chemical properties of wheat bran. *Journal of Cereal Science*, v. 11, n. 3, p. 249–259, 1990.

RIAZ, M. N. *Extruders in food applications*. CRC Press. Boca Raton. USA. 2000. 225 p.

ROBIN, F.; THÉODULOZ, C.; GIANFRANCESCO, A.; PINEAU, N.; SCHUCHMANN, H.P.; PALZER, S. Starch transformation in bran-enriched extruded wheat flour. *Carbohydrate*

Polymers, v. 85, n. 1, p. 65–74, 2011.

SENANAYAKE, S. A. M. A. N. S.; CLARKE, B. A simplified twin screw co-rotating food extruder: design, fabrication and testing. *Journal of Food Engineering*, Volume 40, n. 1–2, p.129–137, 1999

SCHOBER T. J.; BEAN, S. R.; TILLEY, M.; SMITH, B. M.; IOERGER, B. P. Impact of different isolation procedures on the functionality of zein and kafirin. *Journal of Cereal Science*, v. 54, n. 2, p. 241–249, 2011.

SIMABESP. http://www.simabesp.org.br/site/mercado_biscoitos_simabesp.asp. 2013

SINGH, H.; SINGH SODHI, N.; SINGH, N. Characterisation of starches separated from sorghum cultivars grown in India. *Food Chemistry*, v. 119, n. 1, p. 95–100, 2010.

SINGH, H.; CHANG, Y. H.; LIN, J. H.; SINGH, N.; SINGH, N. Influence of heat–moisture treatment and annealing on functional properties of sorghum starch. *Food Research International*, v. 44, n. 9, p. 2949–2954, 2011.

SHUKLA, T. P. Cereal grains and legume processing by extrusion. *Cereal Food Word*, v. 41, n. 1, 35–36, 1996.

SHUKLA, T. P. Critical chemistry of extrusion processing of grains. *Cereal Food Word*, v. 43, n. 1, 43–44, 1998.

SMITH, O. B. Extrusion cooking. In “New Protein Foods. Vol. 2. Technology, Part B”. Academic Press. New York. 1976.

SOKHEY, A. S.; ALI, Y.; HANNA, M. A. Effects of die dimensions on extruder performance. *Journal of Food Engineering*, v. 31, n. 2, p. 251–261, 1997.

SRIBURI, P.; HILL, S. E.; BARCLAY, F. Depolymerisation of cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, v. 38, n. 3, p. 211–218, 1999.

SRICHUWONG, S.; SUNARTI, T. C.; MISHIMA, T.; ISONO, N.; HISAMATSU, M. Starches from different botanical sources II: Contribution of starch structure to swelling and pasting properties. *Carbohydrate Polymers*, v. 62, n. 1, p. 25–34, 2005.

SUBRAHMANYAM, S. N.; HOSENEY, R. C. Shear thinning properties of sorghum starch. *Cereal Chemistry*, v. 72, p. 7–10, 1995.

SULLINS, R. D.; ROONEY, R. W. Light and scanning electron microscopic studies of waxy and nonwaxy endosperm sorghum varieties. *Cereal chemistry*, v. 52, n. 3, p. 361, 1975.

TAYLOR, J. R. N.; SCHÜSSLER, L. The protein compositions of the different anatomical parts of sorghum grain. *Journal of Cereal Science*, v. 4, n. 4, p. 361–369, 1986.

TAYLOR, J.; BEAN, S. R.; IOERGER, B. P.; TAYLOR, J. R. N. Preferential binding of sorghum tannins with γ -kafirin and the influence of tannin binding on kafirin digestibility and biodegradation. *Journal of Cereal Science*. v. 46, n. 1, p. 22–31, 2007.

USDA. Grain: World Markets and Trade. Foreign Agricultural Service. Circular Series FG 11-06, November 06, 2006.

VALLONS, K. J. R.; ARENDT, E. K. Effects of high pressure and temperature on the structural and rheological properties of sorghum starch. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 10, n. 4, p. 449–456, 2009

VÁZQUEZ-ARAÚJO, L.; EDGAR CHAMBERS IV, E.; CHERDCHU, P. Consumer Input for developing human food products made with sorghum grain. *Journal of Food Science*, v. 77, n. 10, p. 384–389, 2012.

WŁODARCZYK-STASIAK, M.; JAMROZ, J. Specific surface area and porosity of starch extrudates determined from nitrogen adsorption data. *Journal of Food Engineering*, v. 93, n. 4, p. 379–385, 2009.

WU, L.; HUANG, Z.; QIN, P.; ; REN, G. Effects of processing on phytochemical profiles and biological activities for production of sorghum tea. *Food Research International*, in press: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.062>, 2012.

YASUMATSU, K.; NAKAYAMA, T. O. M.; CHICHESTER, C. O. Flavonoids of sorghum. *Journal of Food Science*, v. 30, n. 4, p. 663–667, 1965.

YOUSSEF, A. M. M.; MOHARRAM, Y. G.; MOUSTAFFA, E. K. New extruded products from sorghum. *Food Chemistry*, v. 37, n. 3, p. 189–199, 1990.

ZHANG, W.; HOSENEY, R. C. Factors affecting expansion of corn meals with poor and good expansion properties. *Cereal Chemistry*, v. 75, n. 5, p. 639–643, 1998.

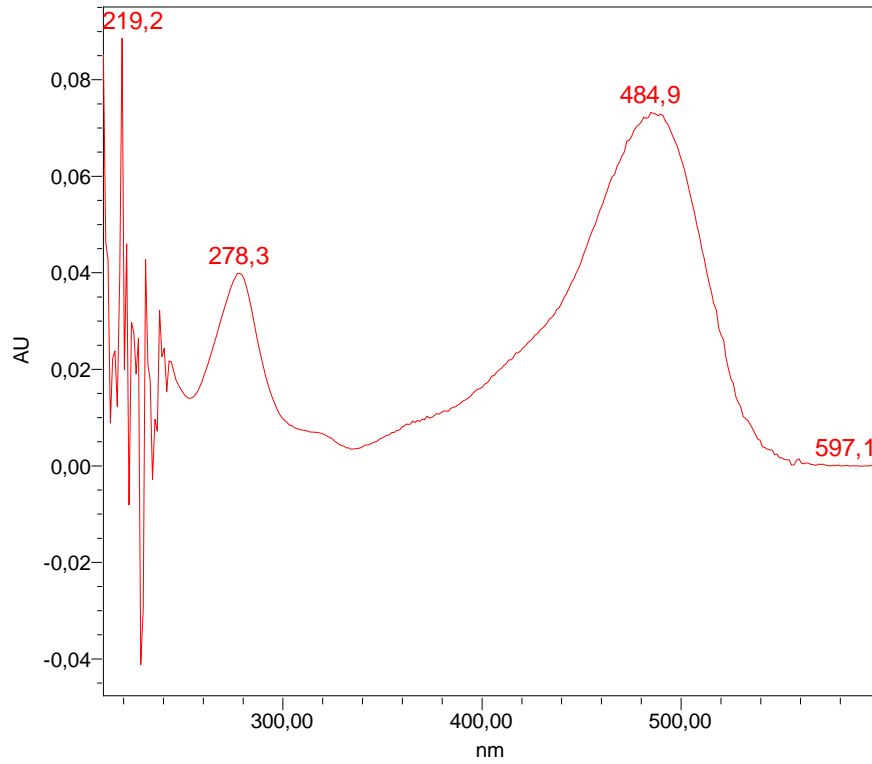
ZHU, L. J.; SHUKRI, R.; DE MESA-STONESTREET, N. J.; ALAVI, S.; DOGAN, H.; SHI, Y. C. Mechanical and microstructural properties of soy protein–high amylose corn starch extrudates in relation to physiochemical changes of starch during extrusion. *Journal of Food Engineering*, v. 100, n. 2, p. 232–238, 2010.

ANEXOS

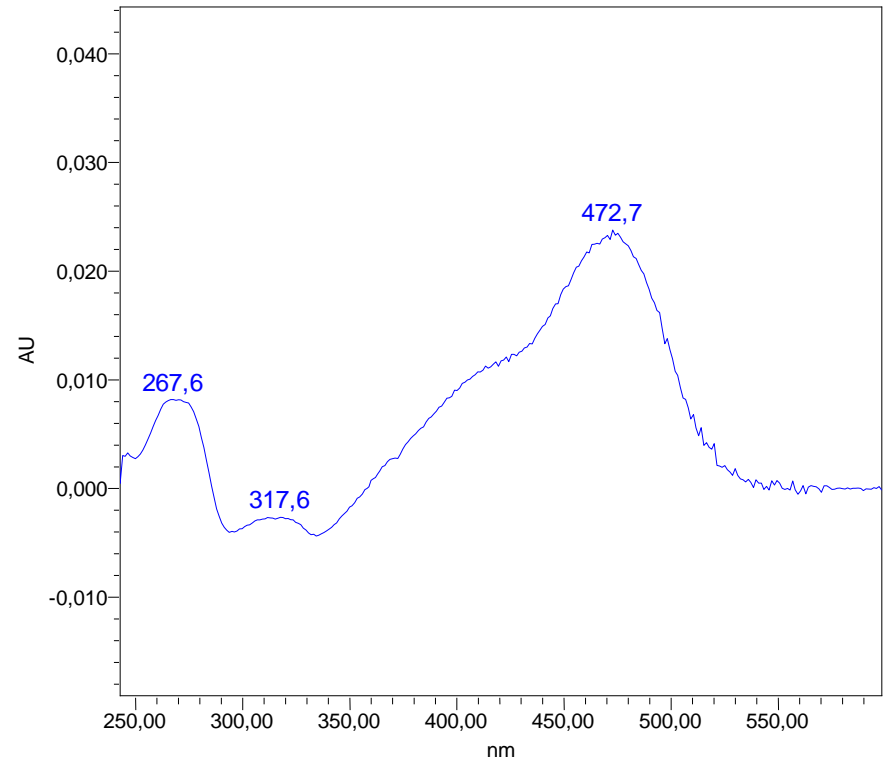
Anexo A. Espectros UV para os picos (1) e (2) do perfil de antocianinas do genótipo BRS310.	68
Anexo B. Resultados do peneiramento de farinhas cruas de seis genótipos de sorgo.....	70
Anexo C. Respostas das variáveis dependentes de extrusão e propriedades físico-químicas de extrudados de seis genótipos de sorgo.....	71
Anexo D. Respostas das variáveis dependentes de extrusão e densidade aparente de extrudados de dois genótipos de sorgo.....	72
Anexo E. Coeficientes de regressão das variáveis independentes no modelo preditivo para: variáveis dependentes de extrusão e densidade aparente de extrudados de dois genótipos de sorgo.	73
Anexo F. Resultados das análises de variâncias para as variáveis dependentes de extrusão e densidade aparente, em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.	74
Anexo G. Superfícies de reposta das variáveis dependentes de extrusão e densidade aparente, em função da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U).	75
Anexo H. Respostas das propriedades de expansão de extrudados de dois genótipos de sorgo.	77
Anexo I. Coeficientes de regressão das variáveis independentes no modelo preditivo para: propriedades de expansão de extrudados de dois genótipos de sorgo.....	78
Anexo J. Resultados das análises de variâncias para as propriedades de expansão, em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.....	79
Anexo K. Superfícies de reposta da densidade aparente e propriedades de expansão dos extrudados, em função da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U).....	80
Anexo L. Respostas das propriedades mecânicas (N_{sr} ; F_{sr} , F_c) de extrudados de dois genótipos de sorgo.	82
Anexo M. Repostas das propriedades mecânicas (W_c) de extrudados de dois genótipos de sorgo e, dureza de biscoitos formulados com farinha extrudada BR700.....	83
Anexo N. Coeficientes de regressão das variáveis independentes no modelo preditivo para: propriedades mecânicas dos produtos.	84
Anexo O. Resultado das análises de variâncias para as propriedades mecânicas dos produtos, em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.	85
Anexo P. Superfícies de reposta das propriedades mecânicas dos produtos, em função da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U).....	86
Anexo Q. Repostas das propriedades de hidratação e diferença total de cor de extrudados de dois genótipos de sorgo.....	88

Anexo R. Coeficientes de regressão das variáveis independentes no modelo preditivo para: propriedades de hidratação e diferença total de cor de dois genótipos de sorgo.....	89
Anexo S. Resultado das análises de variâncias para as propriedades de hidratação e diferença total de cor, em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.....	90
Anexo T. Superfícies de reposta das propriedades de hidratação e diferença total de cor, em função da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U).	91
Anexo U. Respostas das propriedades de pasta (V_{ini} , V_{max} , V_{min}) de extrudados de dois genótipos de sorgo.	93
Anexo V. Respostas das propriedades de pasta (V_{fin} , QV , TR) de extrudados de dois genótipos de sorgo.	94
Anexo W. Coeficientes de regressão das variáveis independentes no modelo preditivo para: propriedades de pasta de extrudados de dois genótipos de sorgo.....	95
Anexo X. Resultado das análises de variâncias para as propriedades de pasta (V_{ini} , V_{max} , V_{min}), em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.	96
Anexo Y. Resultado das análises de variâncias para as propriedades de pasta (V_{fin} , QV , TR), em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.	97
Anexo Z. Superfícies de reposta das propriedades de pasta, em função da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U).	98
Anexo AA. Curvas de viscosidade de extrudados do genótipo de sorgo BRS310.....	101
Anexo AA. Curvas de viscosidade de extrudados do genótipo de sorgo BR700.....	106
Anexo AB. Dados registrados pelo software FITSYS Plus do extrusor Cletral Evolum HT25, durante o processo de dois genótipos de sorgo.....	111
Anexo AC. Cálculos de balance de massa durante o processo de extrusão de dois genótipos de sorgo.	113

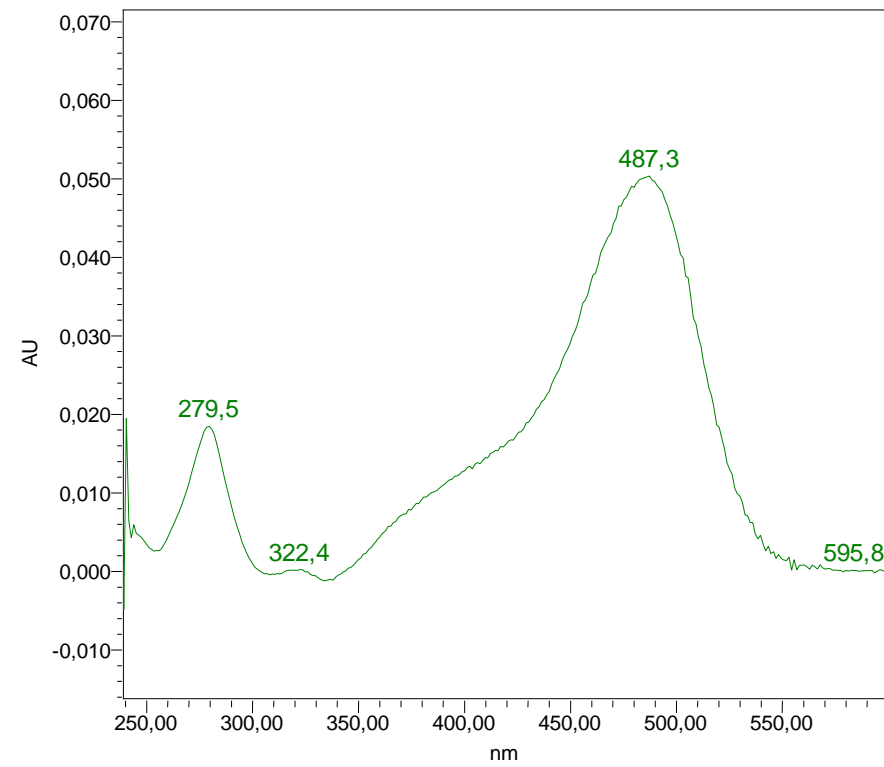
Anexo A. Espectros UV para os picos (1) e (2) do perfil de antocianinas do genótipo BRS310.



(1) 5-methoxyapigeninidina



(2) Apigeninidina



(3) 5,7-dimethoxyapigeninidina

Anexo B. Resultados do peneiramento de farinhas cruas de seis genótipos de sorgo.

Genótipo de sorgo	R_n (g·100 g ⁻¹)							
	$R_{1.680}$	$R_{1.400}$	$R_{1.180}$	$R_{1.000}$	$R_{0.710}$	$R_{0.300}$	$R_{0.106}$	Fundo
CMSXS180	0.33 ± 0.18	3.88 ± 0.64	10.72 ± 0.36	19.45 ± 0.41	29.65 ± 0.33	21.59 ± 0.62	9.57 ± 0.69	3.85 ± 0.92
9010032	1.76 ± 0.18	9.78 ± 0.66	16.97 ± 0.49	23.76 ± 0.25	22.62 ± 0.28	14.15 ± 0.95	7.26 ± 0.45	2.96 ± 0.01
BRS310	1.56 ± 0.08	8.94 ± 0.26	14.98 ± 0.38	22.95 ± 0.97	26.05 ± 0.15	16.08 ± 0.39	7.19 ± 1.35	1.55 ± 0.02
BRS308	1.23 ± 0.19	7.46 ± 0.14	13.58 ± 0.28	21.48 ± 0.05	26.49 ± 0.10	17.23 ± 0.12	9.57 ± 0.32	1.89 ± 0.17
BRS305	0.68 ± 0.48	3.99 ± 0.59	9.44 ± 0.43	16.80 ± 1.19	28.03 ± 0.45	24.16 ± 0.40	11.45 ± 0.70	4.22 ± 0.34
9929034	0.91 ± 0.10	6.67 ± 0.91	13.92 ± 0.71	23.20 ± 0.47	28.36 ± 1.13	16.17 ± 0.90	8.42 ± 0.23	1.41 ± 0.33

R_n : Partículas retidas após peneirado; n : abertura de peneira, em mm.

CMSXS180 e 9010032: genótipos de sorgo de sem taninos, pericarpo branco; BRS310 e BRS308: genótipos de sorgo de baixo teor de taninos, pericarpo vermelho; BRS305 e B9929034: genótipos de sorgo de alto teor de taninos, pericarpo marrom.

^α Média ± desvio padrão de medições em duplicata, calculados com a equação (1).

Anexo C. Respostas das variáveis dependentes de extrusão e propriedades físico-químicas de extrudados de seis genótipos de sorgo.

Genótipo de sorgo	<i>EME</i>		<i>p_f</i>		ρ		<i>IES</i>		<i>IAA</i>		<i>ISA</i>	
	kJ/kg		bar		Kg·m ⁻³		mm ² ·mm ⁻²		g·g ⁻¹		g·100 g ⁻¹	
CMSXS180	^β 1338.26 ± 12.98	^α 51.86 ± 0.17	94.82 ± 0.014	^δ 7.613 ± 1.542	3.91 ± 0.06	^γ 28.48 ± 0.67						
9010032	1276.23 ± 11.15	48.87 ± 0.86	99.44 ± 0.011	6.638 ± 0.641	3.77 ± 0.01	17.90 ± 0.27						
BRS310	1130.73 ± 4.39	43.08 ± 0.33	127.32 ± 0.010	7.891 ± 0.839	4.16 ± 0.13	25.53 ± 0.57						
BRS308	1129.23 ± 9.03	36.92 ± 0.15	140.26 ± 0.021	7.087 ± 0.811	4.07 ± 0.03	22.27 ± 0.28						
BRS305	1512.84 ± 11.49	32.65 ± 1.43	172.47 ± 0.027	4.467 ± 0.418	3.91 ± 0.01	24.24 ± 0.50						
9929034	1279.62 ± 39.79	30.37 ± 0.31	186.29 ± 0.027	4.124 ± 0.428	3.93 ± 0.03	21.20 ± 0.09						

EME: energia mecânica específica; *p_f*: pressão na placa frontal; *IES*: índice de expansão seccional; ρ : densidade aparente; *IAA*: índice de absorção de água; *ISA*: índice de solubilidade em água.

CMSXS180 e 9010032: genótipos de sorgo de sem taninos, pericarpo branco; BRS310 e BRS308: genótipos de sorgo de baixo teor de taninos, pericarpo vermelho; BRS305 e BR700: genótipos de sorgo de alto teor de taninos, pericarpo marrom.

^α Média ± desvio padrão de valores registrados no histórico de parâmetros pelo software FITSYS Plus, durante 10 min (*n* = 600), extrusor Cleextral Evolum HT25.

^β Média ± desvio padrão, *n* = 600, calculados com a equação (4).

^δ Média ± desvio padrão de 20 medições, calculados com as equações (5) e (6).

^γ Média ± desvio padrão de 3 medições, calculados com as equações (14) e (15).

Anexo D. Respostas das variáveis dependentes de extrusão e densidade aparente de extrudados de dois genótipos de sorgo.

Ensaio	Variáveis independentes				Varáveis dependentes					
	Valores codificados		Valores reais		EME (kJ·kg ⁻¹)		p (Mpa)		ρ (kg·m ⁻³)	
	x ₁	x ₂	X ₁	X ₂	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700
1	-1	-1	358.58	15.76	865.26 ± 24.20 ^β	756.50 ± 19.08	4.97 ± 0.10 ^α	2.52 ± 0.05	251.46 ± 19.34 ^δ	142.73 ± 18.81
2	1	-1	641.42	15.76	1433.58 ± 105.6	1597.05 ± 65.63	4.21 ± 0.30	3.50 ± 0.12	168.69 ± 24.57	159.17 ± 13.12
3	-1	1	358.58	24.24	596.42 ± 13.42	949.28 ± 90.20	2.87 ± 0.06	3.86 ± 0.26	505.69 ± 28.04	560.95 ± 48.10
4	1	1	641.42	24.24	987.82 ± 26.12	1039.06 ± 30.24	2.67 ± 0.06	2.60 ± 0.04	429.25 ± 35.26	423.26 ± 68.31
5	-1.414	0	300	20	595.58 ± 10.31	768.94 ± 44.24	3.91 ± 0.07	3.33 ± 0.13	431.91 ± 27.61	251.27 ± 20.40
6	1.414	0	700	20	1275.64 ± 33.63	1414.93 ± 34.56	3.11 ± 0.06	2.95 ± 0.03	268.72 ± 23.38	227.57 ± 13.78
7	0	-1.414	500	14	1236.66 ± 113.0	1398.30 ± 47.54	4.54 ± 0.53	3.64 ± 0.12	127.97 ± 8.57	142.29 ± 13.05
8	0	1.414	500	26	700.56 ± 17.52	771.24 ± 17.85	2.70 ± 0.05	2.53 ± 0.02	520.87 ± 50.94	574.39 ± 39.70
9	0	0	500	20	990.43 ± 18.00	1118.15 ± 33.40	3.29 ± 0.06	3.05 ± 0.05	325.85 ± 40.86	248.91 ± 18.48
10	0	0	500	20	969.48 ± 27.54	1126.51 ± 35.53	3.11 ± 0.06	3.00 ± 0.05	339.00 ± 31.00	228.00 ± 21.97
11	0	0	500	20	966.41 ± 21.39	1105.24 ± 32.56	3.36 ± 0.05	3.07 ± 0.06	350.01 ± 24.96	236.69 ± 19.08
12	0	0	500	20	949.01 ± 17.24	1119.65 ± 41.08	3.36 ± 0.06	3.06 ± 0.06	342.03 ± 24.67	228.17 ± 10.66

X₁: rotação dos parafusos (min⁻¹); X₂: umidade de extrusão (%).

EME: energia mecânica específica; p_f: pressão da massa fundida na placa frontal; ρ: densidade aparente.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

^α Média ± desvio padrão de valores registrados no histórico de parâmetros pelo software FITSYS Plus, durante 10 min (n = 600), extrusor Clextral Evolum HT25.

^β Média ± desvio padrão, n = 600, calculados com a equação (4).

^δ Média ± desvio padrão de 20 medições, calculados com a equação (6).

Anexo E. Coeficientes de regressão das variáveis independentes no modelo preditivo para: variáveis dependentes de extrusão e densidade aparente de extrudados de dois genótipos de sorgo.

Variável	<i>EME</i>				<i>p_f</i>				<i>ρ</i>			
	BRS310		BR700		BRS310		BR700		BRS310		BR700	
	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P
<i>F</i>	240.19	<0.0001 ***	230.49	<0.0001 ***	-0.26	0.0085 ***	-0.10	0.0018 ***	-48.75	0.0008 ***	-19.35	0.0115 **
<i>F</i> ²	-11.95	0.1733 ns	-13.45	0.0313 **	0.14	0.0562 *	0.05	0.0217 **	5.90	0.2344 ns	7.65	0.1443 ns
<i>U</i>	-184.10	<0.0001 ***	-156.50	<0.0001 ***	-0.78	0.0003 ***	-0.14	0.0007 ***	133.80	<0.0001 ***	161.67	<0.0001 ***
<i>U</i> ²	4.55	0.5463 ns	-17.03	0.0167 **	0.20	0.0246 **	0.02	0.1410 ns	-7.05	0.1741 ns	67.11	0.0004 ***
<i>F</i> × <i>U</i>	-44.23	0.0138 **	-187.69	<0.0001 ***	0.14	0.1004 ns	-0.56	<0.0001 ***	1.58	0.7738 ns	-38.53	0.0044 ***

F: frequência de rotação dos parafusos; *U*: unidade de extrusão.

EME: energia mecânica específica; *p_f*: pressão da massa fundida na placa frontal; *ρ*: densidade aparente.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

β: coeficiente de regressão; P: valor de probabilidade; *** nível de significância = 1%; ** nível de significância = 5%; * nível de significância = 10%; ns: não significativo.

Anexo F. Resultados das análises de variâncias para as variáveis dependentes de extrusão e densidade aparente, em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.

Resposta	Genótipo de sorgo	Fonte	GL	SQ	QM	F_{cal}	F_{tab}	P-valor	R^2
<i>EME</i>	BRS310	Regresão	3	740648.7	246882.9	694.00	4.07	<0.0001	0.9959
		Residuo	8	2845.9	355.7				
		Total	11	743494.6					
	BR700	Regresão	5	764376.6	152875.3	26.75	4.39	0.0005	0.9571
		Residuo	6	34295.5	5715.9				
		Total	11	798672.1					
<i>p_f</i>	BRS310	Regresão	3	5.62	1.87	36.60	4.07	<0.0001	0.9321
		Residuo	8	0.41	0.05				
		Total	11	6.03					
	BR700	Regresão	4	1.52	0.38	5.12	4.12	0.0301	0.7452
		Residuo	7	0.52	0.07				
		Total	11	2.03					
ρ	BRS310	Regresão	2	162374.4	81187.2	428.20	4.26	<0.0001	0.9888
		Residuo	9	1706.4	189.6				
		Total	11	164080.8					
	BR700	Regresão	4	246713.5	61678.4	131.28	4.12	<0.0001	0.9869
		Residuo	7	3288.7	469.8				
		Total	11	250002.2					

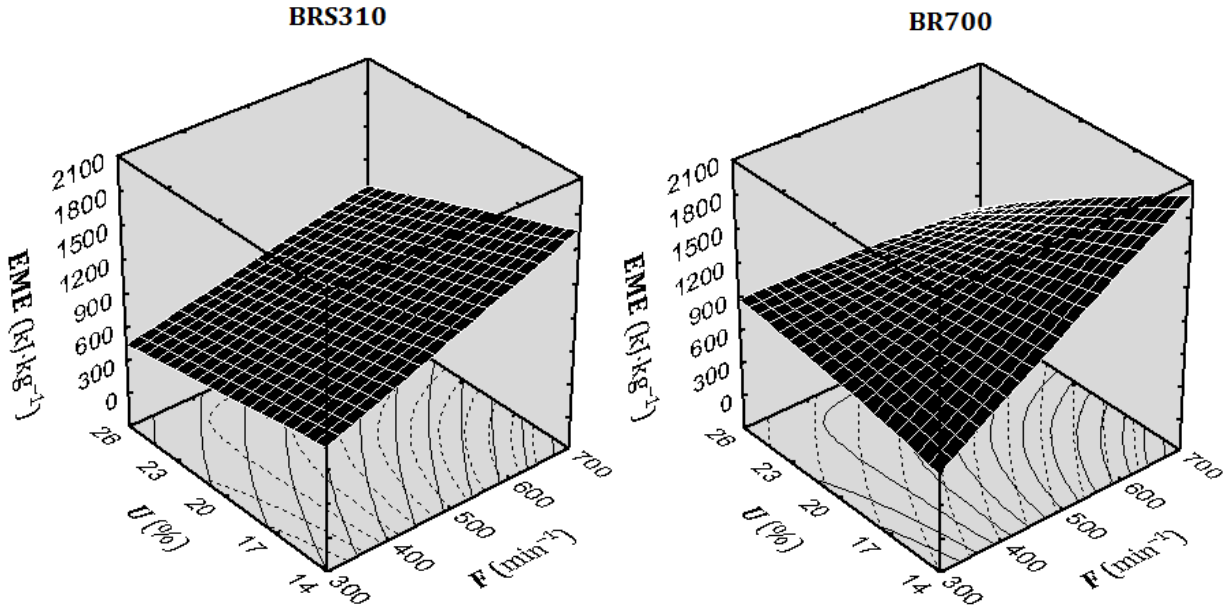
GL: graus de liberdade; *SQ*: soma de quadrados; *QM*: quadrado médio; F_{cal} : valor do teste *F* calculado; F_{tab} : valor do teste *F* tabelado; P-valor: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5%; R^2 : coeficiente de determinação.

EME: energia mecânica específica; p_f : pressão da massa fundida na placa frontal; ρ : densidade aparente.

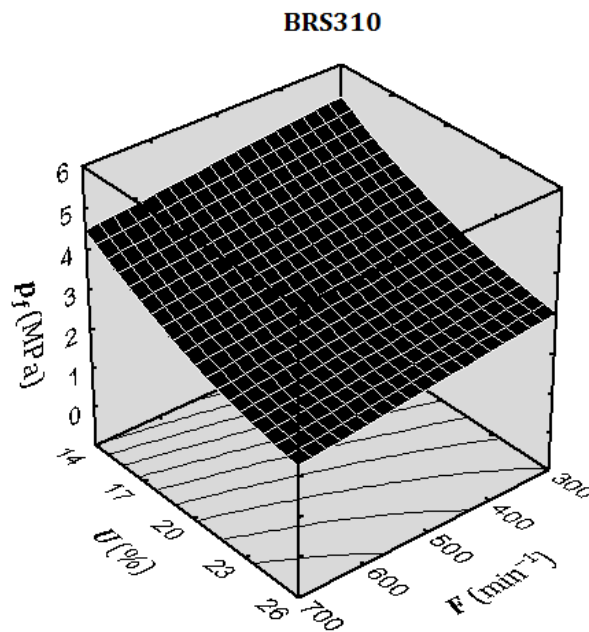
BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

Anexo G. Superfícies de reposta das variáveis dependentes de extrusão e densidade aparente, em função da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U).

**Energia mecânica específica
(EME)**

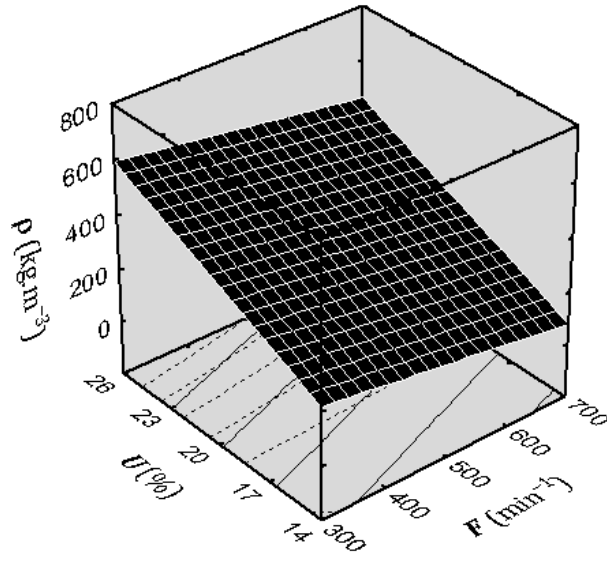


**Pressão na placa frontal
(p_f)**

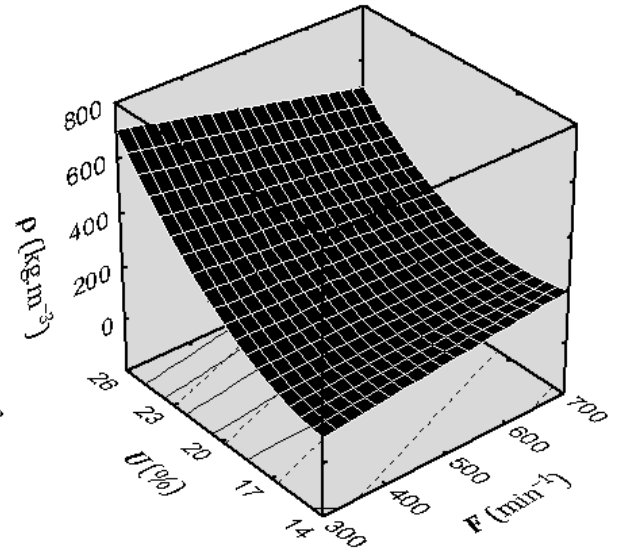


Densidade aparente
(ρ)

BRS310



BR700



Anexo H. Respostas das propriedades de expansão de extrudados de dois genótipos de sorgo.

Ensaio	Variáveis independentes				Varáveis dependentes							
	Valores codificados		Valores reais		<i>IES</i>		<i>IEL</i>		<i>IEV</i>			
	x_1	x_2	X_1	X_2	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700		
1	-1	-1	358.58	15.76	5.61 ± 0.26 ^α	7.53 ± 0.69	0.92 ± 0.08 ^α	1.23 ± 0.16	5.14 ± 0.38 ^α	9.25 ± 1.17		
2	1	-1	641.42	15.76	5.08 ± 0.39	4.24 ± 0.39	1.52 ± 0.16	1.93 ± 0.16	7.75 ± 1.07	8.17 ± 0.66		
3	-1	1	358.58	24.24	3.07 ± 0.24	2.52 ± 0.27	0.75 ± 0.06	0.90 ± 0.12	2.30 ± 0.13	2.25 ± 0.20		
4	1	1	641.42	24.24	2.72 ± 0.18	1.71 ± 0.18	1.00 ± 0.11	1.75 ± 0.18	2.72 ± 0.22	2.99 ± 0.44		
5	-1.414	0	300	20	4.06 ± 0.24	4.74 ± 0.43	0.70 ± 0.04	1.08 ± 0.11	2.83 ± 0.18	5.10 ± 0.42		
6	1.414	0	700	20	3.53 ± 0.28	2.87 ± 0.12	1.30 ± 0.12	1.94 ± 0.10	4.57 ± 0.40	5.57 ± 0.33		
7	0	-1.414	500	14	6.61 ± 0.49	5.32 ± 0.23	1.55 ± 0.16	1.78 ± 0.14	10.18 ± 0.67	9.47 ± 0.85		
8	0	1.414	500	26	2.96 ± 0.17	1.48 ± 0.13	0.74 ± 0.07	1.44 ± 0.11	2.17 ± 0.20	2.13 ± 0.14		
9	0	0	500	20	3.92 ± 0.28	3.30 ± 0.19	0.99 ± 0.10	1.57 ± 0.16	3.86 ± 0.30	5.15 ± 0.39		
10	0	0	500	20	3.78 ± 0.27	3.36 ± 0.26	1.00 ± 0.13	1.68 ± 0.15	3.75 ± 0.46	5.63 ± 0.53		
11	0	0	500	20	3.76 ± 0.38	3.29 ± 0.19	0.89 ± 0.10	1.64 ± 0.13	3.62 ± 0.34	5.41 ± 0.45		
12	0	0	500	20	3.85 ± 0.31	3.22 ± 0.21	0.94 ± 0.11	1.73 ± 0.14	3.49 ± 0.24	5.55 ± 0.26		

X_1 : rotação dos parafusos (min^{-1}); X_2 : umidade de extrusão (%).

IES: índice de expansão seccional; *IEL*: índice de expansão longitudinal; *IEV*: índice de expansão volumétrica.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

^α Média ± desvio padrão de 20 medições, calculados com as equações (5), (7) e (8).

Anexo I. Coeficientes de regressão das variáveis independentes no modelo preditivo para: propriedades de expansão de extrudados de dois genótipos de sorgo.

Variável	<i>IES</i>				<i>IEL</i>				<i>IEV</i>			
	BRS310		BR700		BRS310		BR700		BRS310		BR700	
	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P
<i>F</i>	-0.20	0.0044 ***	-0.84	<0.0001 ***	0.21	0.0014 ***	0.35	0.0007 ***	0.69	0.0012 ***	0.04	0.6087 ns
<i>F</i> ²	-0.06	0.1399 ns	0.36	0.0005 ***	0.02	0.4590 ns	-0.10	0.0335 **	-0.11	0.1906 ns	-0.02	0.7823 ns
<i>U</i>	-1.26	<0.0001 ***	-1.62	<0.0001 ***	-0.23	0.0011 ***	-0.12	0.0131 **	-2.40	<0.0001 ***	-2.82	<0.0001 ***
<i>U</i> ²	0.44	0.0007 ***	0.15	0.0062 ***	0.09	0.0217 **	-0.05	0.1580 ns	1.13	0.0004 ***	0.21	0.0856 *
<i>F</i> × <i>U</i>	0.04	0.3127 ns	0.62	0.0002 ***	-0.09	0.0420 **	0.04	0.3430 ns	-0.55	0.0065 ***	0.46	0.0218 **

F: frequência de rotação dos parafusos; *U*: unidade de extrusão.

IES: índice de expansão seccional; *IEL*: índice de expansão longitudinal; *IEV*: índice de expansão volumétrica.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

β : coeficiente de regressão; P: valor de probabilidade; *** nível de significância = 1%; ** nível de significância = 5%; * nível de significância = 10%; ns: não significativo.

Anexo J. Resultados das análises de variâncias para as propriedades de expansão, em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.

Resposta	Genótipo de sorgo	Fonte	GL	SQ	QM	F_{Cal}	F_{Tab}	P-valor	R^2
<i>IES</i>	BRS310	Regresão	3	14.34	4.78	338.82	4.07	<0.0001	0.9922
		Residuo	8	0.11	0.01				
		Total	11	14.45					
	BR700	Regresão	5	29.09	5.82	30.09	4.39	0.0004	0.9616
		Residuo	6	1.16	0.19				
		Total	11	30.25					
<i>IEL</i>	BRS310	Regresão	4	0.87	0.22	40.12	4.12	<0.0001	0.9582
		Residuo	7	0.04	0.01				
		Total	11	0.90					
	BR700	Regresão	3	1.13	0.38	42.52	4.07	<0.0001	0.9410
		Residuo	8	0.07	0.01				
		Total	11	1.21					
<i>IEV</i>	BRS310	Regresão	4	59.97	14.99	49.78	4.12	<0.0001	0.9660
		Residuo	7	2.11	0.30				
		Total	11	62.07					
	BR700	Regresão	2	64.51	32.26	298.46	4.26	<0.0001	0.9848
		Residuo	9	0.97	0.11				
		Total	11	65.49					

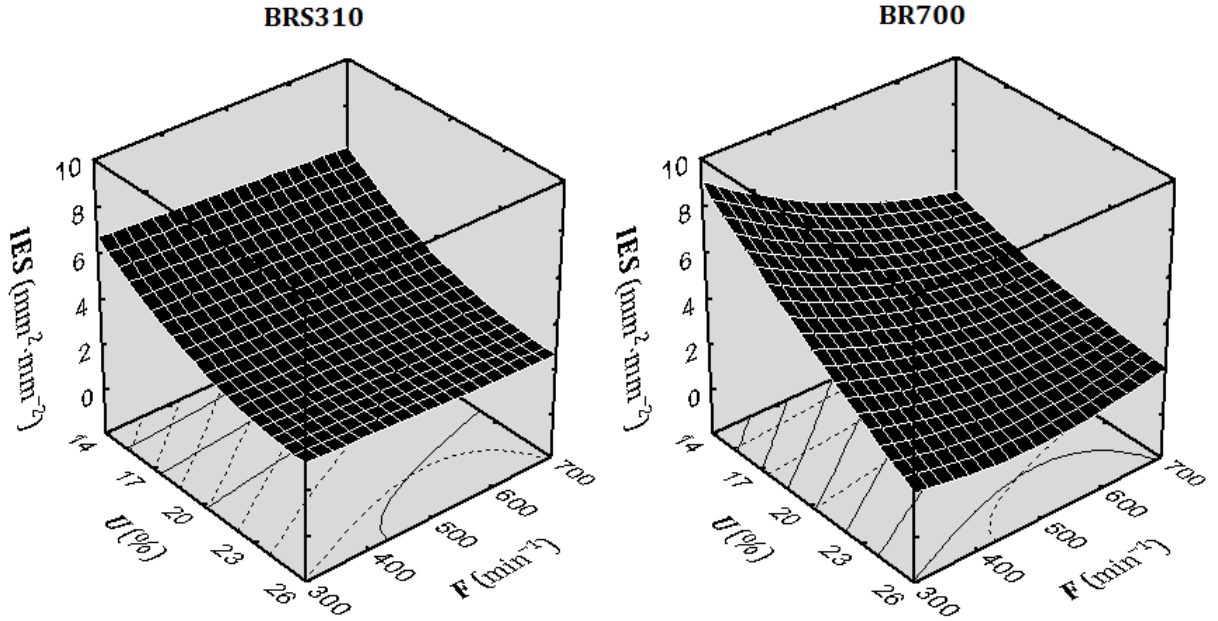
GL: graus de liberdade; *SQ*: soma de quadrados; *QM*: quadrado médio; F_{cal} : valor do teste F calculado; F_{tab} : valor do teste F tabelado; P-valor: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5%; R^2 : coeficiente de determinação.

IES: índice de expansão seccional; *IEL*: índice de expansão longitudinal; *IEV*: índice de expansão volumétrica.

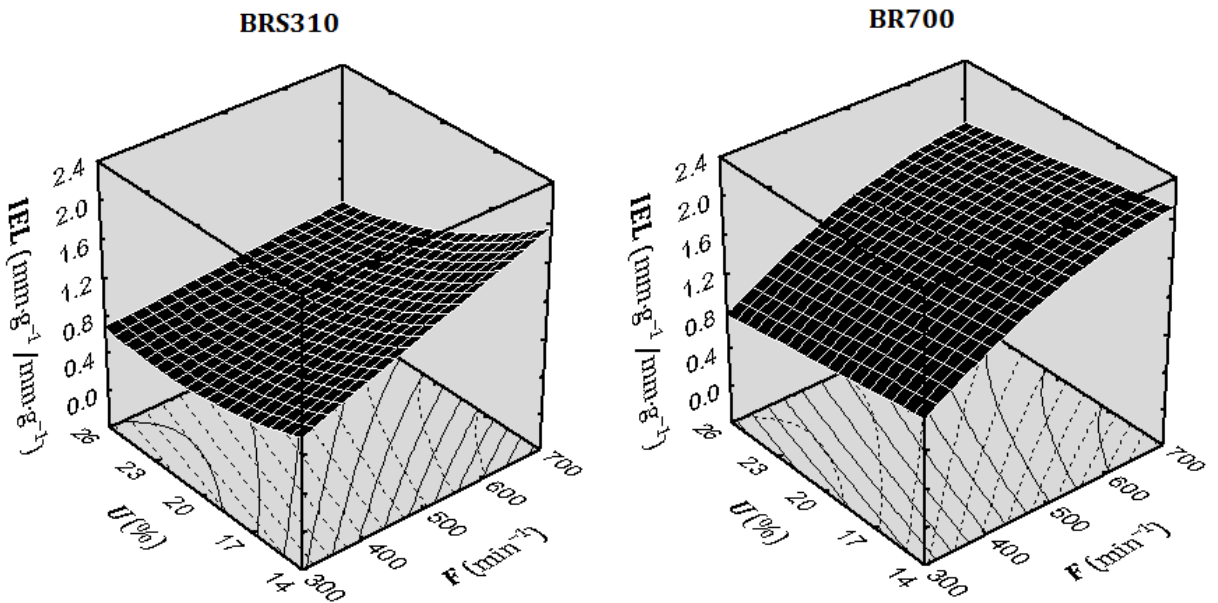
BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

Anexo K. Superfícies de reposta da densidade aparente e propriedades de expansão dos extrudados, em função da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U).

Índice de expansão seccional
(IES)

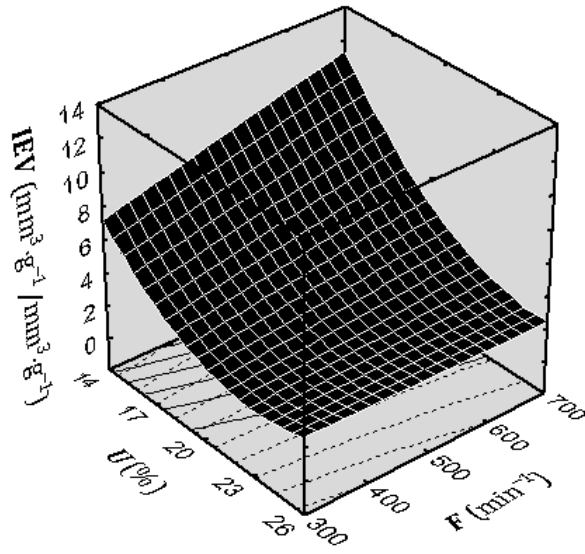


Índice de expansão longitudinal
(IEL)

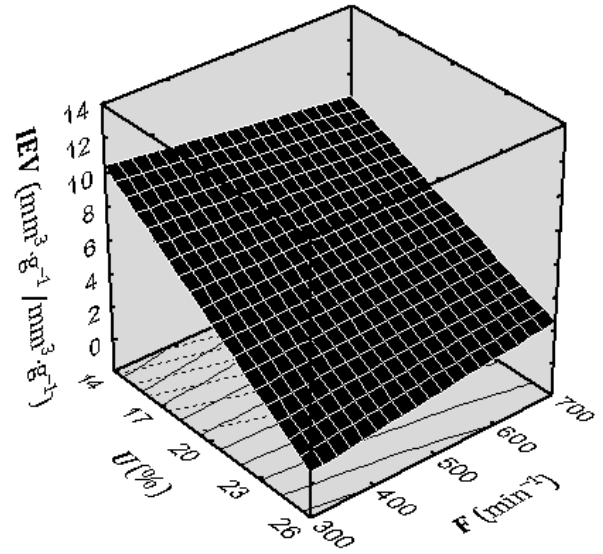


Índice de expansão volumétrica (IEV)

BRS310



BR700



Anexo L. Respostas das propriedades mecânicas (N_{sr} ; F_{sr} , F_c) de extrudados de dois genótipos de sorgo.

Ensaio	Variáveis independentes				Variáveis dependentes					
	Valores codificados		Valores reais		N_{sr} (N·mm) ⁻¹		F_{sr} (N)		F_c (N)	
	x_1	x_2	X_1	X_2	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700
1	-1	-1	358.58	15.76	0.305 ± 0.060 ^α	0.946 ± 0.202	0.099 ± 0.042 ^α	0.011 ± 0.004	0.214 ± 0.051 ^α	0.099 ± 0.026
2	1	-1	641.42	15.76	0.576 ± 0.133	1.095 ± 0.199	0.050 ± 0.025	0.009 ± 0.002	0.203 ± 0.046	0.100 ± 0.018
3	-1	1	358.58	24.24	0.092 ± 0.037	0.172 ± 0.069	0.662 ± 0.404	0.163 ± 0.126	0.165 ± 0.042	0.103 ± 0.033
4	1	1	641.42	24.24	0.129 ± 0.033	0.281 ± 0.097	0.407 ± 0.287	0.098 ± 0.067	0.161 ± 0.039	0.102 ± 0.032
5	-1.414	0	300	20	0.144 ± 0.031	0.456 ± 0.123	0.310 ± 0.185	0.032 ± 0.020	0.164 ± 0.037	0.095 ± 0.019
6	1.414	0	700	20	0.237 ± 0.045	0.585 ± 0.166	0.151 ± 0.055	0.024 ± 0.013	0.191 ± 0.039	0.116 ± 0.025
7	0	-1.414	500	14	0.730 ± 0.140	1.045 ± 0.200	0.035 ± 0.010	0.010 ± 0.004	0.207 ± 0.052	0.104 ± 0.021
8	0	1.414	500	26	0.095 ± 0.025	0.164 ± 0.046	0.573 ± 0.298	0.181 ± 0.099	0.162 ± 0.027	0.124 ± 0.027
9	0	0	500	20	0.206 ± 0.043	0.443 ± 0.145	0.209 ± 0.178	0.025 ± 0.009	0.168 ± 0.037	0.110 ± 0.020
10	0	0	500	20	0.206 ± 0.068	0.497 ± 0.134	0.243 ± 0.130	0.021 ± 0.006	0.178 ± 0.049	0.111 ± 0.019
11	0	0	500	20	0.192 ± 0.068	0.516 ± 0.165	0.276 ± 0.180	0.024 ± 0.008	0.173 ± 0.037	0.109 ± 0.024
12	0	0	500	20	0.177 ± 0.055	0.516 ± 0.125	0.211 ± 0.113	0.023 ± 0.006	0.179 ± 0.028	0.112 ± 0.026

X_1 : rotação dos parafusos (min^{-1}); X_2 : umidade de extrusão (%).

N_{sr} : frequência de rupturas estruturais; F_{sr} : média da força específica de rupturas estruturais; F_c : média da força de compressão do extrudado. BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

^α Média ± desvio padrão de 25 perfurações (BRS310) e 40 perfurações (BR700), calculados com as equações (10), (11) e (12). Os dados foram registrados da curva de forças de compressão pelo software Exponent, analisador de textura TA-XT Plus.

Anexo M. Repostas das propriedades mecânicas (W_c) de extrudados de dois genótipos de sorgo e, dureza de biscoitos formulados com farinha extrudada BR700.

Ensaio	Variáveis independentes				Varáveis dependentes		
	Níveis codificados		Valores reais		W_c (N·mm)		F_{max} (N)
	x_1	x_2	X_1	X_2	BRS310	BR700	BR700
1	-1	-1	358.58	15.76	0.725 ± 0.220	0.109 ± 0.035	29.491 ± 4.050
2	1	-1	641.42	15.76	0.366 ± 0.099	0.095 ± 0.030	46.424 ± 9.561
3	-1	1	358.58	24.24	2.061 ± 0.883	0.721 ± 0.429	22.992 ± 5.344
4	1	1	641.42	24.24	1.308 ± 0.385	0.415 ± 0.211	28.335 ± 5.712
5	-1.414	0	300	20	1.180 ± 0.339	0.226 ± 0.088	14.838 ± 4.058
6	1.414	0	700	20	0.845 ± 0.289	0.218 ± 0.083	45.420 ± 3.364
7	0	-1.414	500	14	0.295 ± 0.097	0.104 ± 0.032	35.714 ± 5.139
8	0	1.414	500	26	1.813 ± 0.574	0.824 ± 0.330	26.817 ± 2.556
9	0	0	500	20	0.950 ± 0.320	0.275 ± 0.101	31.669 ± 3.138
10	0	0	500	20	1.027 ± 0.423	0.243 ± 0.088	30.625 ± 4.439
11	0	0	500	20	1.151 ± 0.447	0.232 ± 0.086	31.918 ± 2.574
12	0	0	500	20	1.114 ± 0.417	0.236 ± 0.094	30.277 ± 2.687

X_1 : rotação dos parafusos (min^{-1}); X_2 : umidade de extrusão (%).

W_c : trabalho de crocância; F_{max} : dureza do biscoito.

BRS310: genótipo de sorgo de baixo teor de taninos; BR700: genótipo de sorgo de alto teor de taninos.

^α Média \pm desvio padrão de 25 perfurações (BRS310) e 40 (BR700), calculados com a equação (13).

^β Média \pm desvio padrão de valores registrados na curva de forças de compressão pelo software Exponent, analisador de textura TA-XT Plus, $n = 15$.

Anexo N. Coeficientes de regressão das variáveis independentes no modelo preditivo para: propriedades mecânicas dos produtos.

Variável	N_{sr}				F_{sr}				F_c			
	BRS310		BR700		BRS310		BR700		BRS310		BR700	
	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P
F	0.055	0.0015 ***	0.055	0.0200 **	-0.066	0.0095 ***	-0.010	0.0006 ***	0.0028	0.2002 ns	0.0038	0.0034 ***
F^2	-0.009	0.2044 ns	0.029	0.1235 ns	0.007	0.6026 ns	0.005	0.0082 ***	0.0027	0.2469 ns	-0.0048	0.0023 ***
U	-0.195	<0.0001 ***	-0.354	<0.0001 ***	0.210	0.0003 ***	0.060	<0.0001 ***	-0.0194	0.0015 ***	0.0043	0.0023 ***
U^2	0.102	0.0003 ***	0.071	0.0136 **	0.044	0.0387 **	0.038	<0.0001 ***	0.0063	0.0467 **	-0.0004	0.4371 ns
$F \times U$	-0.059	0.0033 ***	-0.010	0.6004 ns	-0.052	0.0464 **	-0.016	0.0004 ***	0.0018	0.5120 ns	-0.0005	0.4630 ns

Variável	W_c				F_{max}	
	BRS310		BR700		BR700	
	β	P	β	P	β	P
F	-0.198	0.0083 ***	-0.041	0.0094 ***	<0.0001 ***	
F^2	-0.004	0.9275 ns	-0.014	0.1628 ns	-0.218	0.5371 ns
U	0.553	0.0004 ***	0.244	<0.0001 ***	-4.646	0.0005 ***
U^2	0.017	0.6611 ns	0.107	0.0008 ***	0.350	0.3467 ns
$F \times U$	-0.098	0.1166 ns	-0.073	0.0050 ***	0.0053 ***	

F : frequência de rotação dos parafusos; U : umidade de extrusão.

N_{sr} : frequência de rupturas estruturais; F_{sr} : média da força específica de rupturas estruturais; F_c : média da força de compressão.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

β : coeficiente de regressão; P: valor de probabilidade; *** nível de significância = 1%; ** nível de significância = 5%; * nível de significância = 10%; ns: não significativo.

Anexo O. Resultado das análises de variâncias para as propriedades mecânicas dos produtos, em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.

Resposta	Genótipo de sorgo	Fonte	GL	SQ	QM	F_{Cal}	F_{Tab}	P-valor	R^2
N_{sr}	BRS310	Regresão	4	0.4131	0.1033	54.07	4.12	<0.0001	0.9687
		Residuo	7	0.0134	0.0019				
		Total	11	0.4265					
	BR700	Regresão	3	1.0563	0.3521	87.92	4.07	<0.0001	0.9706
		Residuo	8	0.0320	0.0040				
		Total	11	1.0884					
F_{sr}	BRS310	Regresão	4	0.4112	0.1028	71.42	4.12	<0.0001	0.9761
		Residuo	7	0.0101	0.0014				
		Total	11	0.4213					
	BR700	Regresão	5	0.0404	0.0081	87.44	4.39	<0.0001	0.9865
		Residuo	6	0.0006	0.0001				
		Total	11	0.0409					
F_c	BRS310	Regresão	2	0.0032	0.0016	20.41	4.26	0.0005	0.8196
		Residuo	9	0.0007	0.0001				
		Total	11	0.0040					
	BR700	Regresão	3	0.0004	0.0001	3.09	4.07	0.0898	0.5371
		Residuo	8	0.0004	0.0000				
		Total	11	0.0008					
W_c	BRS310	Regresão	2	2.7607	1.3803	94.48	4.26	<0.0001	0.9545
		Residuo	9	0.1315	0.0146				
		Total	11	2.8921					
	BR700	Regresão	4	0.5905	0.1476	67.05	4.12	<0.0001	0.9746
		Residuo	7	0.0154	0.0022				
		Total	11	0.6059					
F_{max}	BR700	Regresão	3	743.23	247.74	25.26	4.07	0.0002	0.9042
		Residuo	8	78.47	9.81				
		Total	11	821.71					

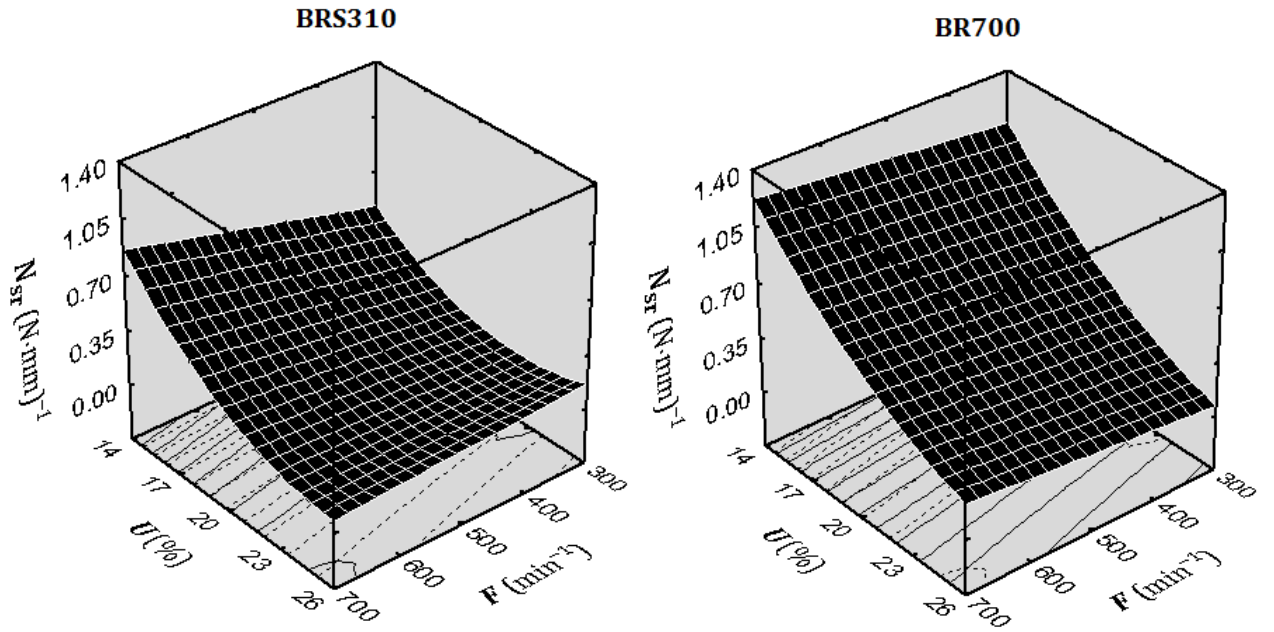
GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; F_{cal} : valor do teste F calculado; F_{tab} : valor do teste F tabelado; P-valor: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5%, R^2 : coeficiente de determinação.

N_{sr} : frequência de rupturas estruturais; F_{sr} : média da força específica de rupturas estruturais; F_c : média da força de compressão; W_c : trabalho de crocância.

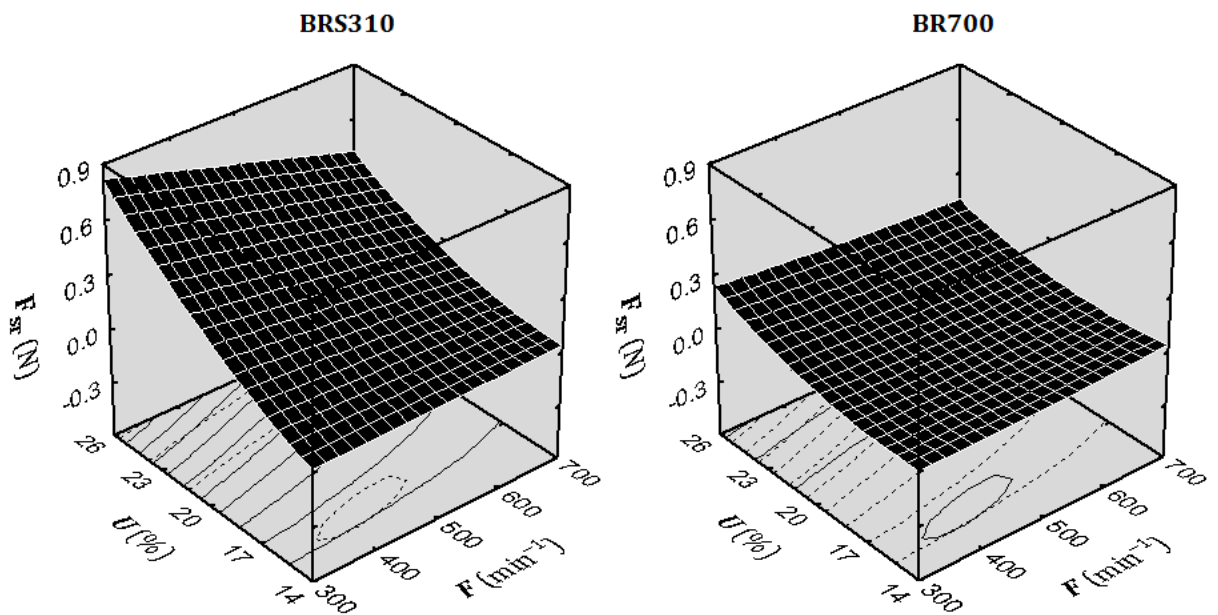
BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

Anexo P. Superfícies de reposta das propriedades mecânicas dos produtos, em função da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U).

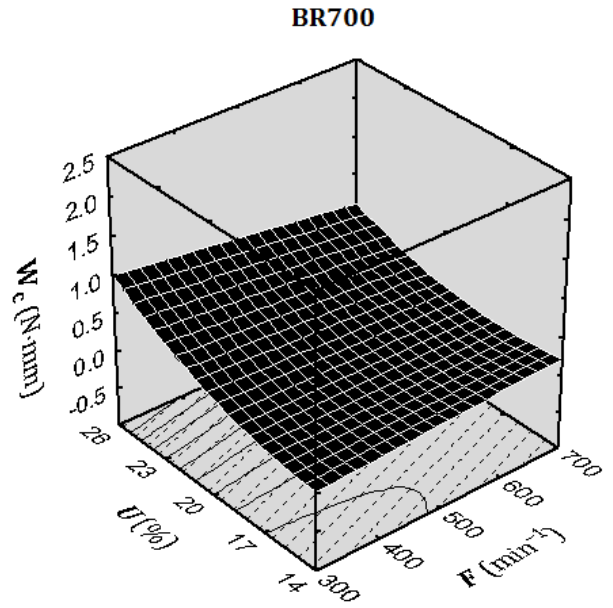
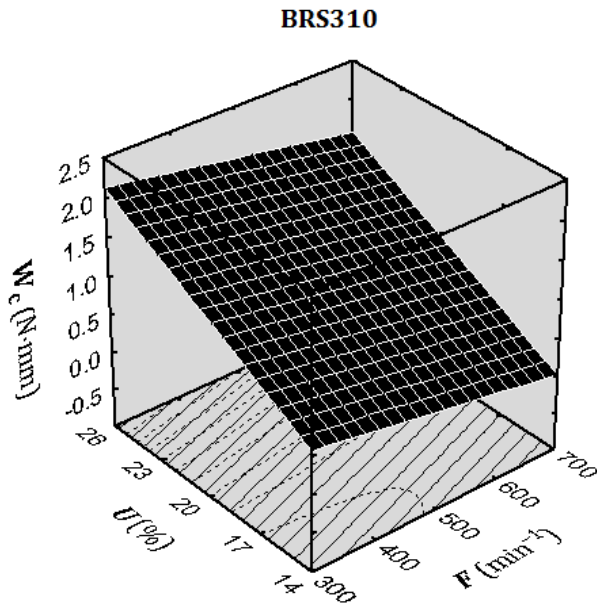
Frequência de rupturas estruturais
(N_{sr})



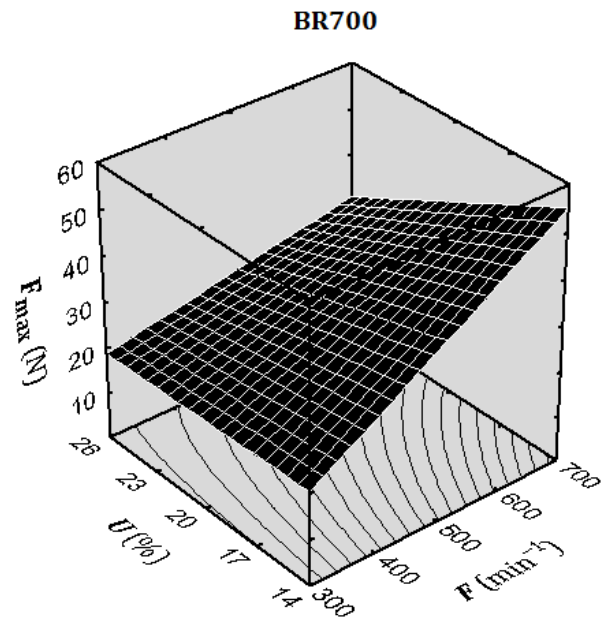
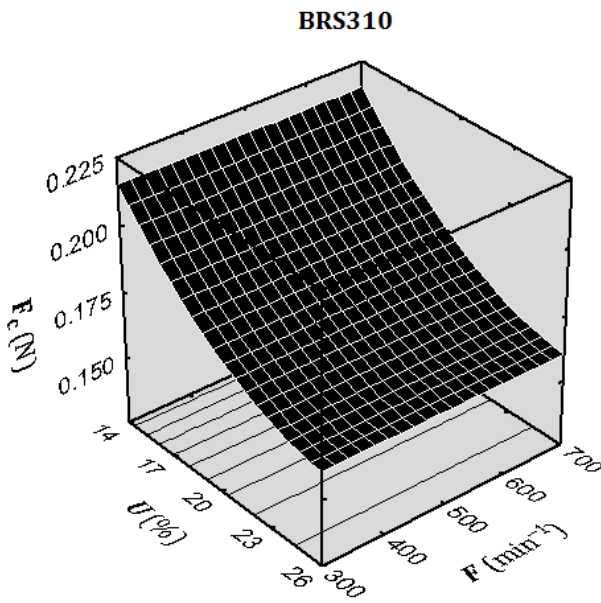
Média da força específica de rupturas estruturais
(F_{sr})



Trabalho de crocância
(W_c)



Média da força de compressão
(F_c)



Anexo Q. Repostas das propriedades de hidratação e diferença total de cor de extrudados de dois genótipos de sorgo.

Ensaio	Variáveis independentes				Varáveis dependentes					
	Valores codificados		Valores reais		IAA (g w·g ⁻¹ si)		ISA (g ss·g ⁻¹)		ΔE	
	x ₁	x ₂	X ₁	X ₂	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700
1	-1	-1	358.58	15.76	4.11 ± 0.26 ^α	4.07 ± 0.02	13.64 ± 0.78 ^α	33.77 ± 0.57	11.35 ± 0.45 ^β	8.85 ± 0.28
2	1	-1	641.42	15.76	3.76 ± 0.04	3.50 ± 0.03	19.01 ± 1.29	45.22 ± 2.40	9.18 ± 0.28	10.77 ± 0.87
3	-1	1	358.58	24.24	4.49 ± 0.07	4.65 ± 0.04	9.29 ± 0.60	17.94 ± 1.14	10.15 ± 0.23	7.52 ± 0.57
4	1	1	641.42	24.24	3.89 ± 0.17	4.66 ± 0.07	11.61 ± 0.28	25.74 ± 1.34	10.33 ± 0.37	8.52 ± 0.54
5	-1.414	0	300	20	4.39 ± 0.50	4.57 ± 0.01	7.60 ± 2.25	23.61 ± 0.63	10.96 ± 0.26	7.10 ± 1.02
6	1.414	0	700	20	4.07 ± 0.35	4.00 ± 0.07	15.87 ± 2.18	43.40 ± 2.45	11.16 ± 0.29	9.85 ± 0.63
7	0	-1.414	500	14	3.86 ± 0.08	3.76 ± 0.02	20.77 ± 1.77	39.02 ± 0.77	12.54 ± 0.27	8.85 ± 1.08
8	0	1.414	500	26	3.58 ± 0.35	4.77 ± 0.14	8.41 ± 1.68	20.83 ± 1.40	10.62 ± 0.46	7.59 ± 0.28
9	0	0	500	20	4.65 ± 0.56	4.32 ± 0.06	12.41 ± 1.84	29.96 ± 2.14	11.54 ± 0.46	8.45 ± 0.54
10	0	0	500	20	4.66 ± 0.08	4.11 ± 0.08	12.47 ± 0.32	30.25 ± 1.28	11.06 ± 0.29	9.03 ± 0.69
11	0	0	500	20	4.74 ± 0.25	4.17 ± 0.21	11.52 ± 0.31	30.65 ± 1.78	11.08 ± 0.36	8.67 ± 0.51
12	0	0	500	20	4.85 ± 0.32	4.28 ± 0.16	12.34 ± 0.61	29.87 ± 1.95	11.73 ± 0.11	8.97 ± 1.03

X₁: rotação dos parafusos (min⁻¹); X₂: umidade de extrusão (%).

IAA : índice de absorção de água; ISA: índice de solubilidade em água; ΔE: diferença total da cor.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

^α Média ± desvio padrão de medições em triplicata, calculados com as equações (14) e (15).

^β Média ± desvio padrão, n = 4, calculados com a equação (18).

Anexo R. Coeficientes de regressão das variáveis independentes no modelo preditivo para: propriedades de hidratação e diferença total de cor de dois genótipos de sorgo.

Variável	IAA				ISA				ΔE			
	BRS310		BR700		BRS310		BR700		BRS310		BR700	
	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P
<i>F</i>	-0.18	0.0128 ns	-0.17	0.0151 ns	2.42	0.0006 ***	5.90	<0.0001 ***	-0.21	0.1708 ns	0.85	0.0029 ***
<i>F</i> ²	-0.23	0.0086 ***	0.02	0.6815 ns	-0.17	0.4112 ns	1.40	0.0021 ***	-0.41	0.0536 ns	-0.01	0.9165 ns
<i>U</i>	0.01	0.7033 ns	0.39	0.0014 ***	-3.65	0.0002 ***	-7.63	<0.0001 ***	-0.35	0.0628 ns	-0.67	0.0059 ***
<i>U</i> ²	-0.48	0.0010 ***	0.01	0.8435 ns	1.26	0.0056 ***	-0.39	0.0659 ns	-0.15	0.3349 ns	-0.14	0.2826 ns
<i>F</i> × <i>U</i>	-0.06	0.2644 ns	0.15	0.0568 ns	-0.76	0.0415 ns	-0.91	0.0136 ns	0.59	0.0402 ns	-0.23	0.1871 ns

F: frequência de rotação dos parafusos; *U*: unidade de extrusão.

IAA : índice de absorção de água; ISA: índice de solubilidade em água; ΔE : diferença total da cor.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

β : coeficiente de regressão; P: valor de probabilidade; *** nível de significância = 1%; ** nível de significância = 5%; * nível de significância = 10%; ns: não significativo.

Anexo S. Resultado das análises de variâncias para as propriedades de hidratação e diferença total de cor, em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.

Resposta	Genótipo de sorgo	Fonte	GL	SQ	QM	F_{Cal}	F_{Tab}	P-valor	R^2
IAA	BRS310	Regresão	3	1.83	0.61	25.51	4.07	0.0002	0.9054
		Residuo	8	0.19	0.02				
		Total	11	2.02					
	BR700	Regresão	2	1.48	0.74	47.37	4.26	<0.0001	0.9134
		Residuo	9	0.14	0.02				
		Total	11	1.62					
ISA	BRS310	Regresão	4	167.09	41.77	41.96	4.12	<0.0001	0.9600
		Residuo	7	6.97	1.00				
		Total	11	174.06					
	BR700	Regresão	4	762.31	190.58	54.31	4.12	<0.0001	0.9688
		Residuo	7	24.56	3.51				
		Total	11	786.87					
ΔE	BRS310	Regresão	1	1.26	1.26	1.88	4.96	0.2006	0.1727
		Residuo	10	6.72	0.67				
		Total	11	7.99					
	BR700	Regresão	2	9.38	4.69	24.60	4.26	0.0002	0.8453
		Residuo	9	1.72	0.19				
		Total	11	11.09					

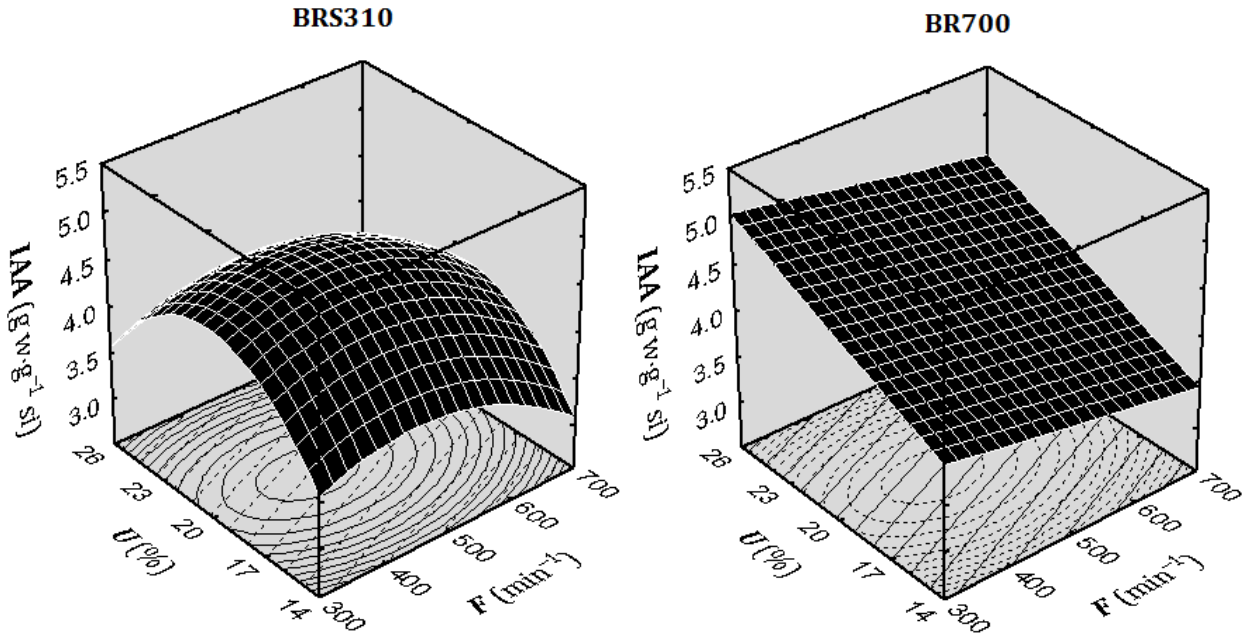
GL: graus de liberdade; *SQ*: soma de quadrados; *QM*: quadrado médio; F_{cal} : valor do teste *F* calculado; F_{tab} : valor do teste *F* tabelado; P-valor: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5%, R^2 : coeficiente de determinação.

IAA: índice de absorção de água; *ISA*: índice de solubilidade em água; ΔE : diferença total da cor.

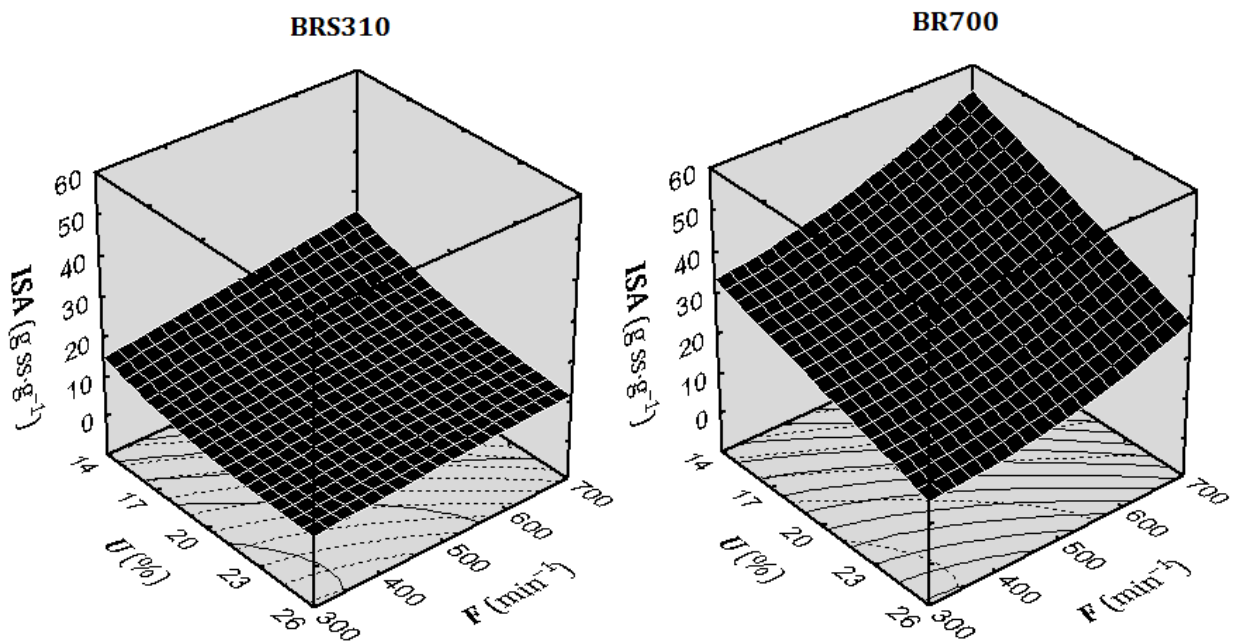
BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

Anexo T. Superfícies de reposta das propriedades de hidratação e diferença total de cor, em função da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U).

**Índice de absorção de água
(IAA)**

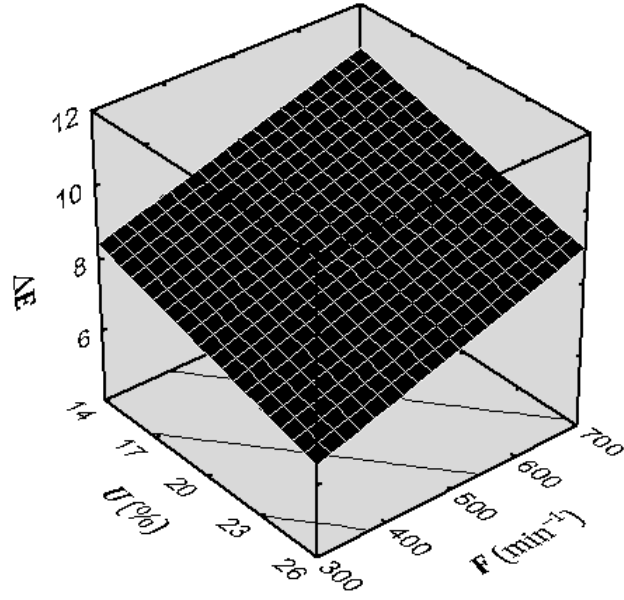


**Índice de solubilidade em água
(ISA)**



Diferença total da cor
(ΔE)

BR700



Anexo U. Respostas das propriedades de pasta (V_{ini} , V_{max} , V_{min}) de extrudados de dois genótipos de sorgo.

Ensaio	Variáveis independentes				Varáveis dependentes					
	Valores codificados		Valores reais		V_{ini} (cP)		V_{max} (cP)		V_{min} (cP)	
	x_1	x_2	X_1	X_2	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700
1	-1	-1	358.58	15.76	203.0 ± 11.3 ^α	110.0 ± 5.7	275.0 ± 0.0 ^α	136.5 ± 7.8	102.0 ± 2.8 ^α	29.5 ± 0.7
2	1	-1	641.42	15.76	190.0 ± 9.9	92.0 ± 2.8	218.5 ± 7.8	102.5 ± 3.5	57.0 ± 0.0	12.0 ± 1.4
3	-1	1	358.58	24.24	176.5 ± 17.7	268.5 ± 4.9	292.0 ± 1.4	349.0 ± 5.7	128.5 ± 3.5	52.5 ± 9.2
4	1	1	641.42	24.24	184.0 ± 5.7	202.0 ± 8.5	282.0 ± 8.5	259.5 ± 4.9	121.5 ± 7.8	74.5 ± 2.1
5	-1.414	0	300	20	134.0 ± 9.9	203.0 ± 5.7	275.0 ± 7.1	257.0 ± 11.3	143.5 ± 9.2	66.5 ± 6.4
6	1.414	0	700	20	333.5 ± 46.0	112.5 ± 0.7	397.5 ± 0.7	133.5 ± 0.7	89.5 ± 8.5	47.5 ± 0.0
7	0	-1.414	500	14	246.5 ± 19.1	110.5 ± 10.6	280.0 ± 15.6	126.5 ± 7.8	59.5 ± 3.5	36.0 ± 1.4
8	0	1.414	500	26	100.0 ± 8.5	249.5 ± 9.2	261.5 ± 3.5	321.5 ± 2.1	117.0 ± 9.9	53.5 ± 0.7
9	0	0	500	20	213.0 ± 2.8	105.5 ± 6.4	362.5 ± 4.9	158.0 ± 2.8	106.5 ± 6.4	33.0 ± 4.2
10	0	0	500	20	247.5 ± 7.8	116.0 ± 4.2	360.5 ± 13.4	155.5 ± 2.1	99.5 ± 10.6	41.0 ± 1.4
11	0	0	500	20	206.0 ± 2.8	108.0 ± 11.3	293.5 ± 0.7	152.5 ± 3.5	87.0 ± 14.1	37.5 ± 7.8
12	0	0	500	20	230.0 ± 26.9	112.5 ± 4.9	347.5 ± 10.6	157.0 ± 8.5	99.5 ± 3.5	31.0 ± 4.2

X_1 : rotação dos parafusos (min^{-1}); X_2 : umidade de extrusão (%).

V_{ini} : viscosidade inicial; V_{max} : viscosidade máxima; V_{min} : viscosidade mínima.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

^α Média ± desvio padrão de valores registrados na curva de viscosidade pelo software Thermocline, analisador rápido de viscosidade RVA, $n = 2$.

Anexo V. Respostas das propriedades de pasta (V_{fin} , QV , TR) de extrudados de dois genótipos de sorgo.

Ensaio	Variáveis independentes				Varáveis dependentes							
	Valores codifiados		Valores reais		V_{fin} (cP)		QV (cP)		TR (cP)			
	x_1	x_2	X_1	X_2	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700		
1	-1	-1	358.58	15.76	156.0 ± 1.4 ^α	71.5 ± 3.5	173.0 ± 2.8 ^β	107.0 ± 7.1	54.0 ± 4.2 ^β	42.0 ± 2.8		
2	1	-1	641.42	15.76	99.5 ± 7.8	55.0 ± 5.7	161.5 ± 7.8	90.5 ± 2.1	42.5 ± 7.8	43.0 ± 4.2		
3	-1	1	358.58	24.24	250.0 ± 11.3	151.5 ± 4.9	163.5 ± 2.1	296.5 ± 3.5	121.5 ± 7.8	99.0 ± 4.2		
4	1	1	641.42	24.24	223.0 ± 8.5	147.0 ± 5.7	160.5 ± 0.7	185.0 ± 2.8	101.5 ± 0.7	72.5 ± 3.5		
5	-1.414	0	300	20	244.5 ± 2.1	140.5 ± 3.5	131.5 ± 2.1	190.5 ± 4.9	101.0 ± 7.1	74.0 ± 2.8		
6	1.414	0	700	20	161.5 ± 4.9	95.0 ± 0.0	308.0 ± 4.9	86.0 ± 0.0	72.0 ± 4.2	47.5 ± 0.7		
7	0	-1.414	500	14	93.5 ± 3.5	69.0 ± 4.2	220.5 ± 12.0	90.5 ± 6.4	34.0 ± 0.0	33.0 ± 2.8		
8	0	1.414	500	26	245.5 ± 9.2	148.0 ± 2.8	144.5 ± 6.4	268.0 ± 2.8	128.5 ± 0.7	94.5 ± 3.5		
9	0	0	500	20	195.0 ± 1.4	95.0 ± 8.5	256.0 ± 1.4	117.0 ± 1.4	88.5 ± 4.9	62.0 ± 4.2		
10	0	0	500	20	182.0 ± 17.0	97.5 ± 4.9	273.5 ± 0.7	118.0 ± 5.7	82.5 ± 6.4	56.5 ± 3.5		
11	0	0	500	20	184.5 ± 9.2	92.0 ± 2.8	174.0 ± 4.2	121.5 ± 7.8	86.5 ± 2.1	60.5 ± 3.5		
12	0	0	500	20	197.5 ± 6.4	91.5 ± 7.8	227.0 ± 5.7	108.5 ± 3.5	85.0 ± 5.7	61.5 ± 2.1		

X_1 : rotação dos parafusos (min^{-1}); X_2 : umidade de extrusão (%).

V_{fin} : viscosidade final; QV : quebrada viscosidade; TR : tendência à retrogradação.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

^α Média ± desvio padrão de valores registrados na curva de viscosidade pelo software Thermocline, analisador rápido de viscosidade RVA, $n = 2$.

^β Média ± desvio padrão de medições em duplicata, calculados com as equações (16) e (17).

Anexo W. Coeficientes de regressão das variáveis independentes no modelo preditivo para: propriedades de pasta de extrudados de dois genótipos de sorgo.

Variável	V_{ini}				V_{max}				V_{min}			
	BRS310		BR700		BRS310		BR700		BRS310		BR700	
	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P
F	34.58	0.0133 **	-26.56	0.0005 ***	13.34	0.3278 ns	-37.27	<0.0001 ***	-16.05	0.0113 **	-2.80	0.1769 ns
F^2	1.03	0.8971 ns	23.44	0.0011 ***	-11.53	0.4337 ns	20.31	0.0002 ***	9.16	0.0649 *	8.50	0.0174 **
U	-29.96	0.0197 **	58.13	<0.0001 ***	6.79	0.5945 ns	80.66	<0.0001 ***	21.54	0.0049 ***	13.78	0.0032 ***
U^2	-29.22	0.0283 **	34.56	0.0003 ***	-44.28	0.0406 **	34.69	<0.0001 ***	-4.97	0.2193 ns	2.38	0.2739 ns
$F \times U$	5.13	0.6192 ns	-12.13	0.0139 **	11.63	0.5243 ns	-13.88	0.0014 ***	9.50	0.1012 ns	9.88	0.0219 **

Variável	V_{fin}				QV				TR			
	BRS310		BR700		BRS310		BR700		BRS310		BR700	
	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P
F	-25.11	0.0026 ***	-10.67	0.0017 ***	29.39	0.1522 ns	-34.47	0.0004 ***	-9.06	0.0020 ***	-7.87	0.0030 ***
F^2	5.59	0.1612 ns	10.16	0.0027 ***	-15.56	0.4325 ns	13.75	0.0081 ***	-0.56	0.6130 ns	0.78	0.4863 ns
U	54.06	0.0003 ***	35.47	<0.0001 ***	-14.75	0.4087 ns	66.88	<0.0001 ***	32.52	<0.0001 ***	21.68	0.0001 ***
U^2	-11.16	0.0345 **	5.53	0.0154 **	-34.19	0.1411 ns	34.25	0.0006 ***	-3.19	0.0498 **	2.28	0.1038 ns
$F \times U$	7.38	0.1492 ns	3.00	0.1214 ns	2.13	0.9284 ns	-23.75	0.0033 ***	-2.13	0.1915 ns	-6.88	0.0118 **

F : frequência de rotação dos parafusos; U : unidade de extrusão.

V_{ini} : viscosidade inicial; V_{max} : viscosidade máxima; V_{min} : viscosidade mínima.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

β : coeficiente de regressão; P: valor de probabilidade; *** nível de significância = 1%; ** nível de significância = 5%; * nível de significância = 10%; ns: não significativo.

Anexo X. Resultado das análises de variâncias para as propriedades de pasta (V_{ini} , V_{max} , V_{min}), em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.

Resposta	Genótipo de sorgo	Fonte	GL	SQ	QM	F_{Cal}	F_{Tab}	P-valor	R^2
V_{ini}	BRS310	Regresão	3	22519.1	7506.4	3.81	4.07	0.0578	0.5883
		Residuo	8	15758.6	1969.8				
		Total	11	38277.7					
	BR700	Regresão	5	42734.5	8546.9	54.00	4.39	<0.0001	0.9783
		Residuo	6	949.6	158.3				
		Total	11	43684.2					
V_{max}	BRS310	Regresão	1	11746.0	11746.0	6.67	4.96	0.0273	0.4001
		Residuo	10	17615.2	1761.5				
		Total	11	29361.2					
	BR700	Regresão	5	72822.3	14564.5	60.16	4.39	<0.0001	0.9804
		Residuo	6	1452.6	242.1				
		Total	11	74274.9					
V_{min}	BRS310	Regresão	2	5921.7	2960.8	19.90	4.26	0.0005	0.7949
		Residuo	9	1339.2	148.8				
		Total	11	7260.9					
	BR700	Regresão	3	2338.7	779.6	6.95	4.07	0.0128	0.7228
		Residuo	8	896.8	112.1				
		Total	11	3235.6					

GL : graus de liberdade; SQ : soma de quadrados; QM : quadrado médio; F_{cal} : valor do teste F calculado; F_{tab} : valor do teste F tabelado; P-valor: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5%, R^2 : coeficiente de determinação.

V_{ini} : viscosidade inicial; V_{max} : viscosidade máxima; V_{min} : viscosidade mínima.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

Anexo Y. Resultado das análises de variâncias para as propriedades de pasta (V_{fin} , QV , TR), em função da frequência de rotação dos parafusos e umidade de extrusão.

Resposta	Genótipo de sorgo	Fonte	GL	SQ	QM	F_{Cal}	F_{Tab}	P-valor	R^2
V_{fin}	BRS310	Regresão	3	29426.3	9808.8	101.73	4.07	<0.0001	0.9745
		Residuo	8	771.4	96.4				
		Total	11	30197.7					
	BR700	Regresão	4	11714.7	2928.7	24.32	4.12	0.0003	0.9329
		Residuo	7	843.1	120.4				
		Total	11	12557.7					
QV	BR700	Regresão	5	55369.6	11073.93	128.24	4.39	<0.0001	0.9907
		Residuo	6	518.1	86.35				
		Total	11	55887.8					
TR	BRS310	Regresão	3	9179.6	3059.87	275.16	4.07	<0.0001	0.9904
		Residuo	8	89.0	11.12				
		Total	11	9268.6					
	BR700	Regresão	3	4443.3	1481.09	146.48	4.07	<0.0001	0.9828
		Residuo	8	80.9	10.11				
		Total	11	4524.2					

GL : graus de liberdade; SQ : soma de quadrados; QM : quadrado médio; F_{cal} : valor do teste F calculado; F_{tab} : valor do teste F tabelado; P-valor: valor de probabilidade considerando um nível de significância de 5%, R^2 : coeficiente de determinação.

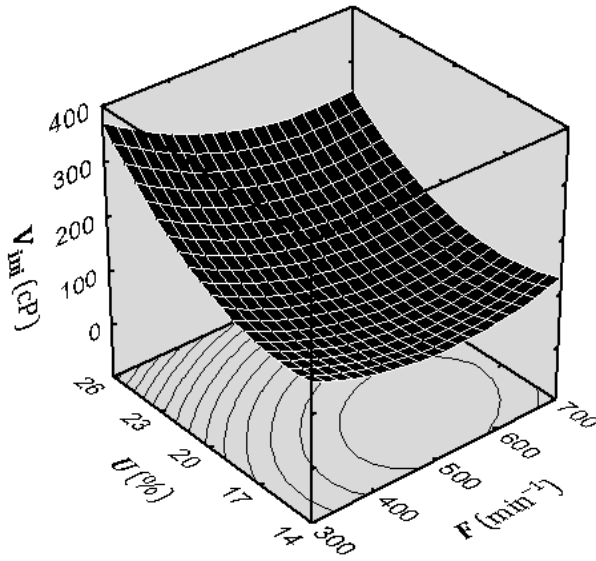
V_{ini} : viscosidade inicial; V_{max} : viscosidade máxima; V_{min} : viscosidade mínima.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

Anexo Z. Superfícies de reposta das propriedades de pasta, em função da frequência de rotação dos parafusos (F) e umidade de extrusão (U).

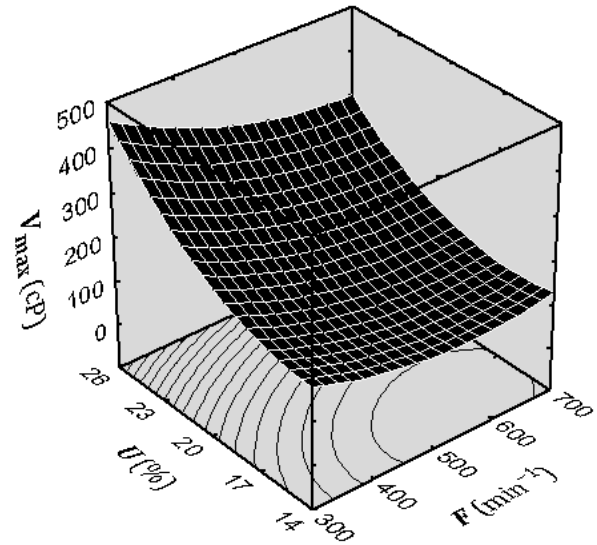
Viscosidade inicial
(V_{ini})

BR700



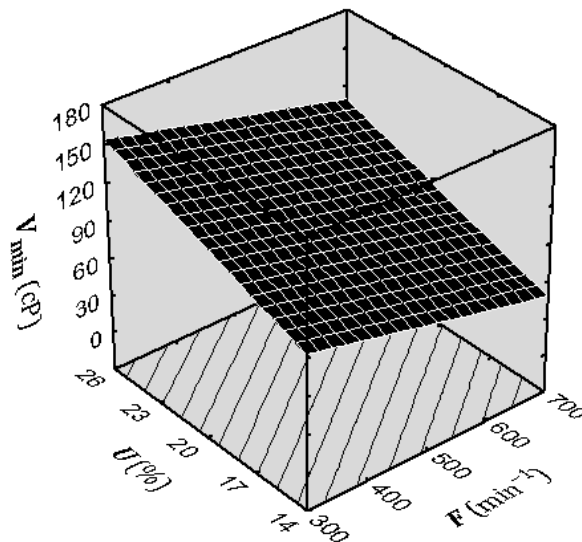
Viscosidade máxima
(V_{max})

BR700

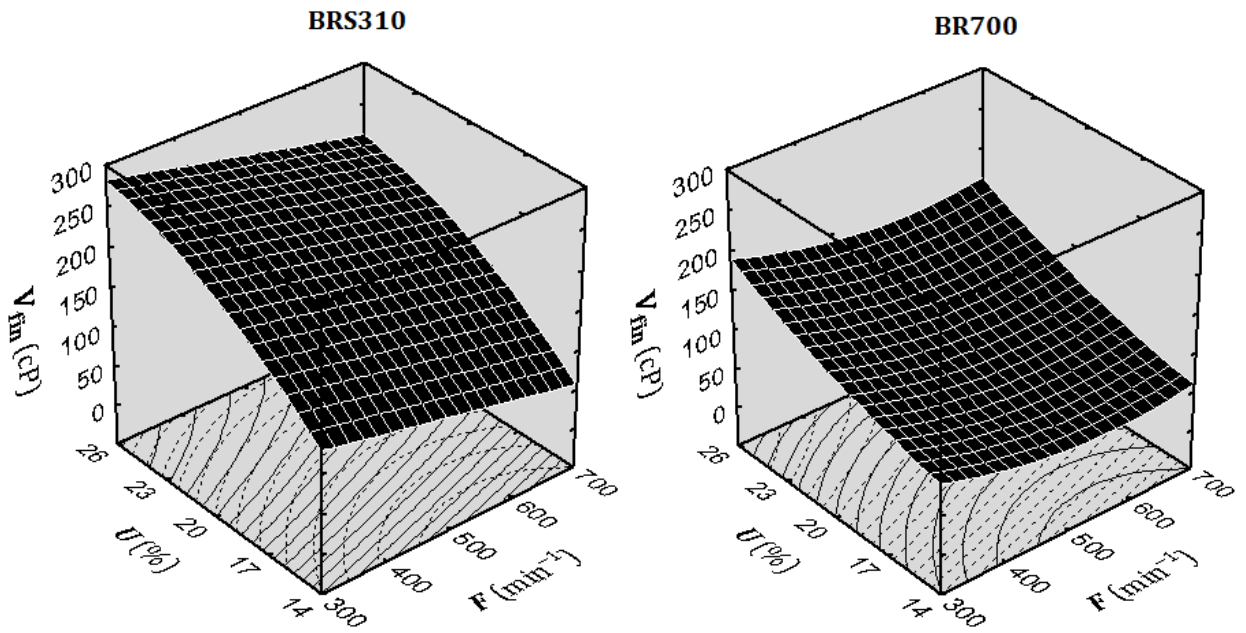


Viscosidade mínima
(V_{min})

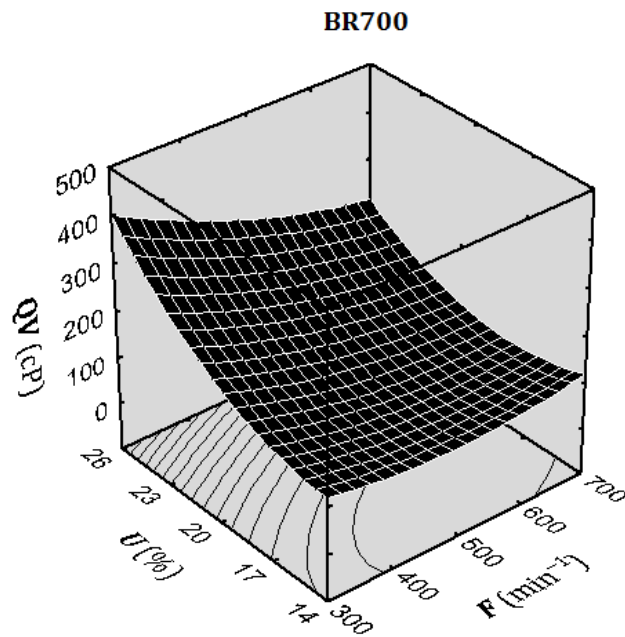
BRS310



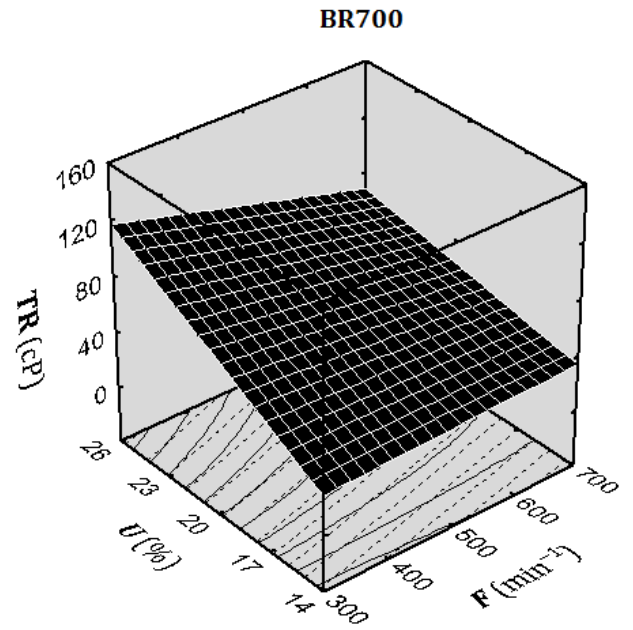
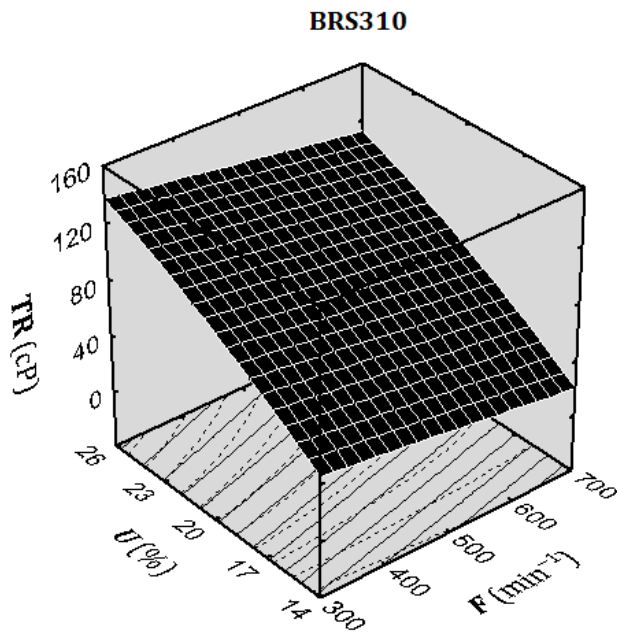
Viscosidade final (V_{fin})



Quebra da viscosidade (QV)



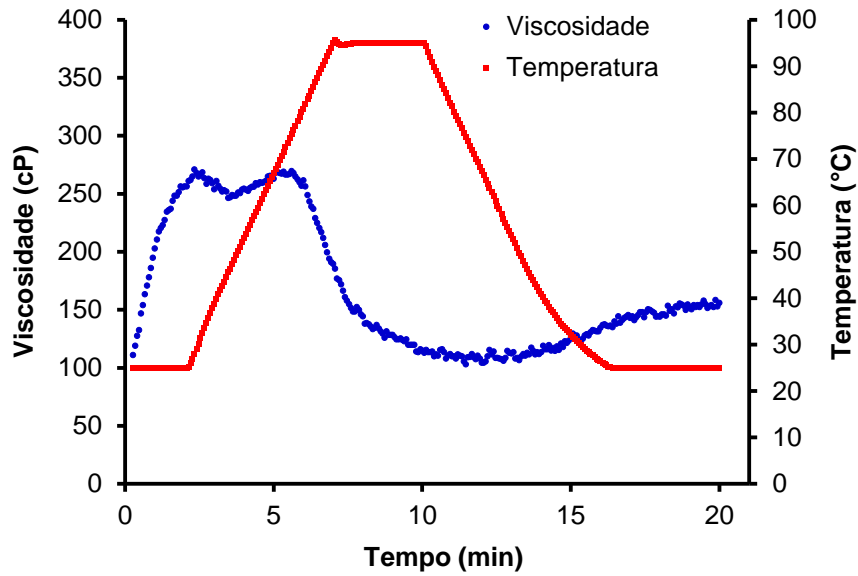
Tendência à retrogradação
(TR)



Anexo AA. Curvas de viscosidade de extrudados do genótipo de sorgo BRS310.

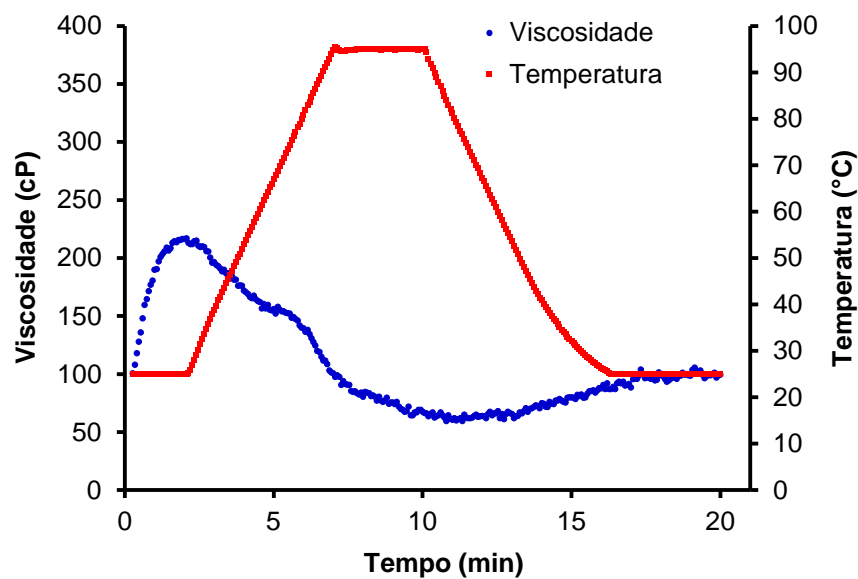
Ensaio 1

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 359 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 15,8 \%$



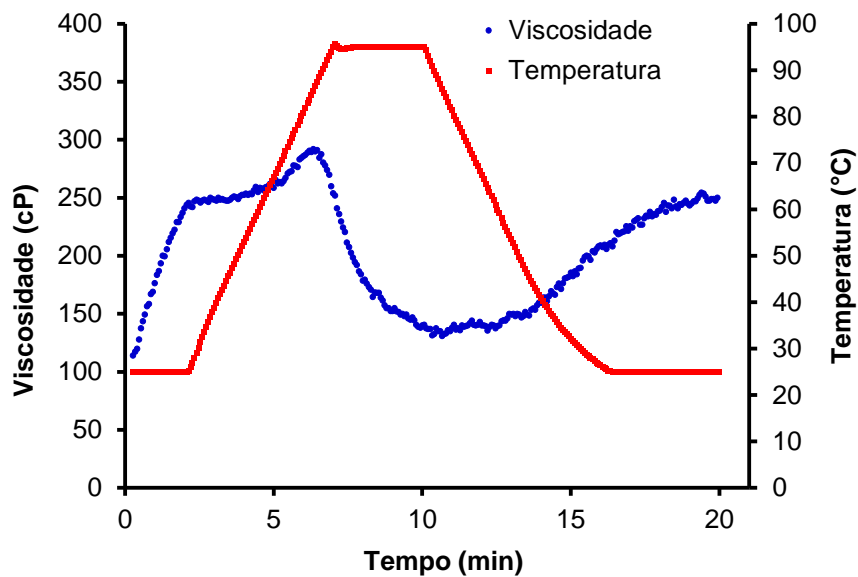
Ensaio 2

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 641 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 15,8 \%$



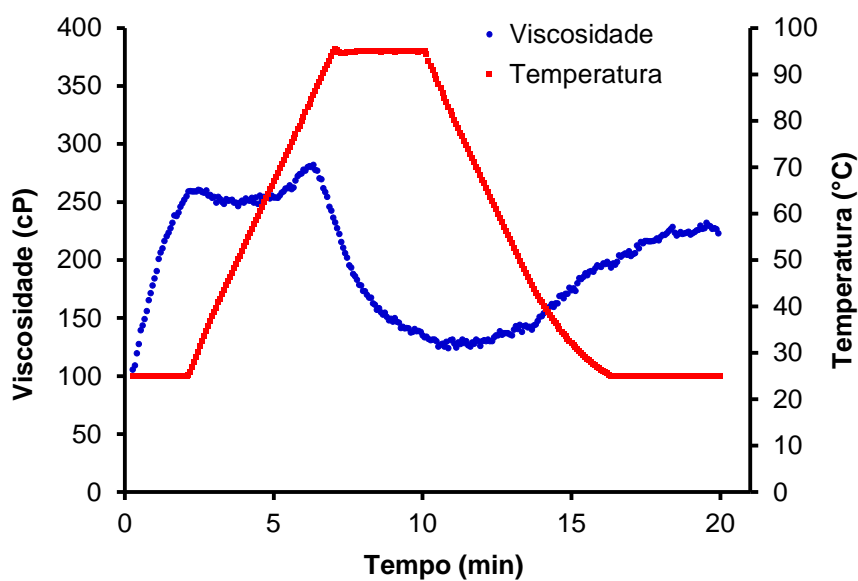
Ensaio 3

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 359 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 24,2 \%$



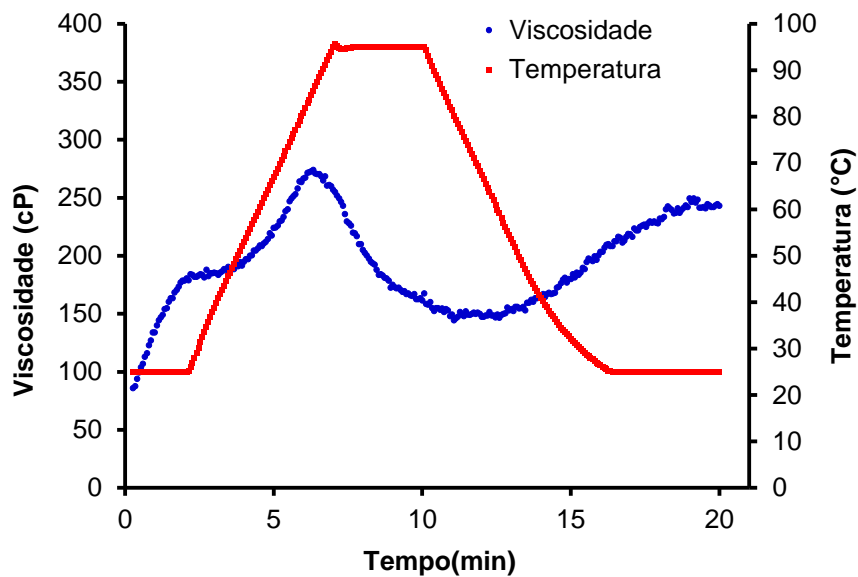
Ensaio 4

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 641 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 24,2 \%$



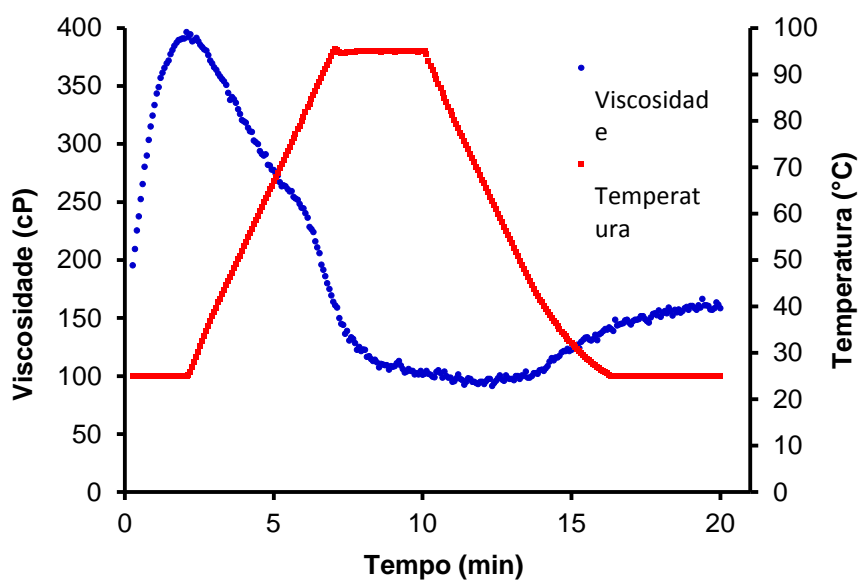
Ensaio 5

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 300 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 20 \%$



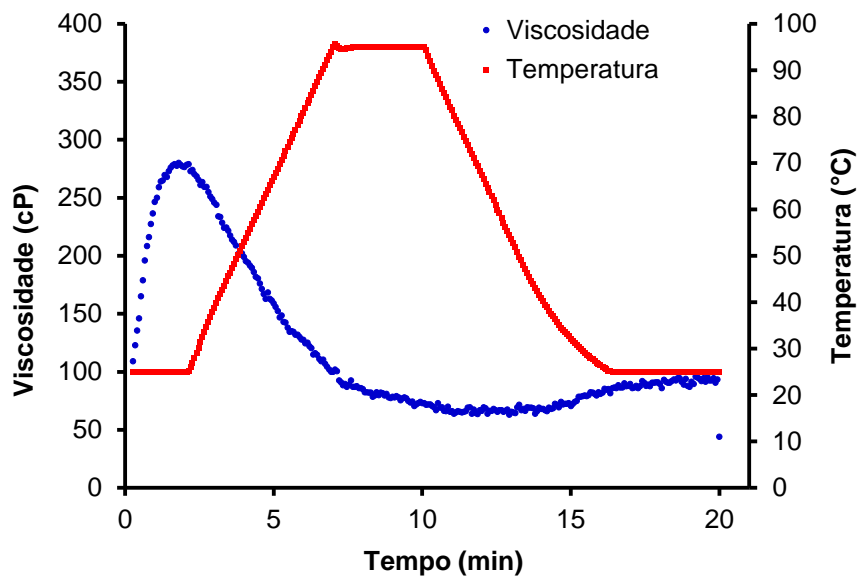
Ensaio 6

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 359 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 15,8 \%$



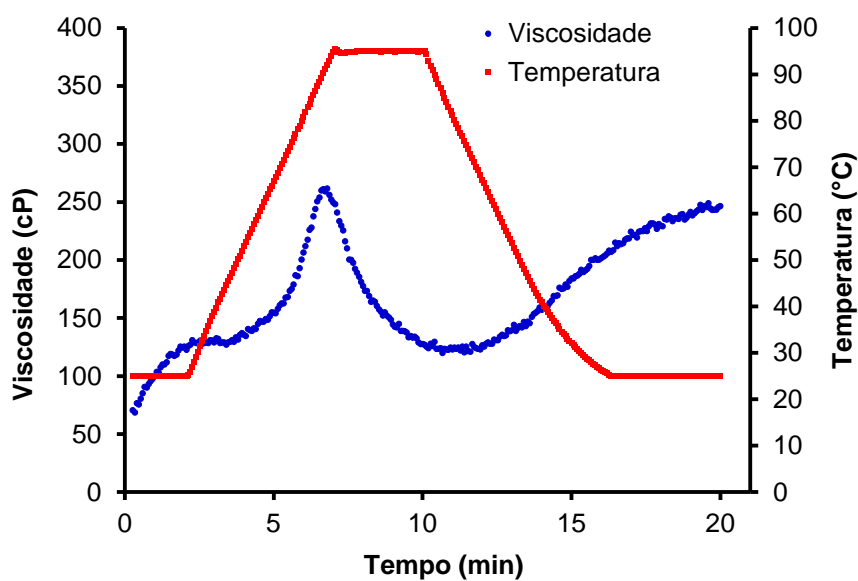
Ensaio 7

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 500 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 14 \%$



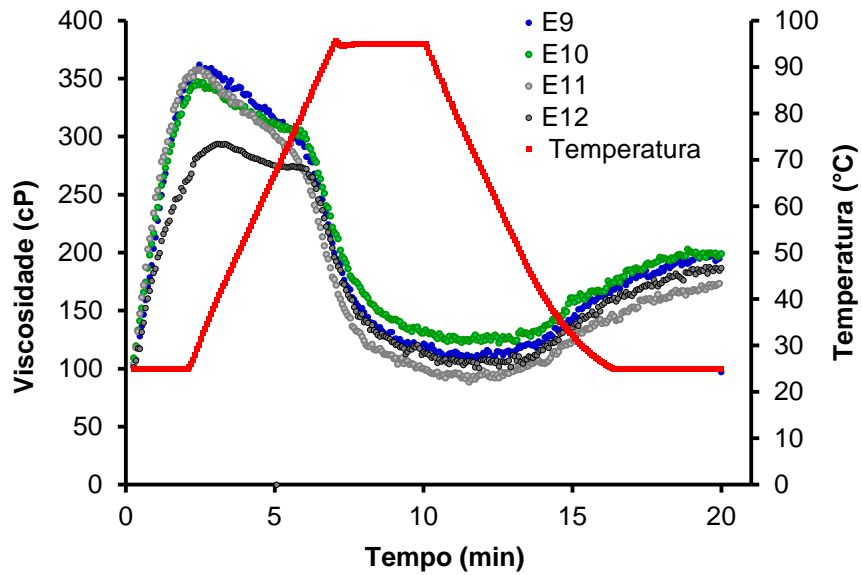
Ensaio 8

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 500 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 26 \%$



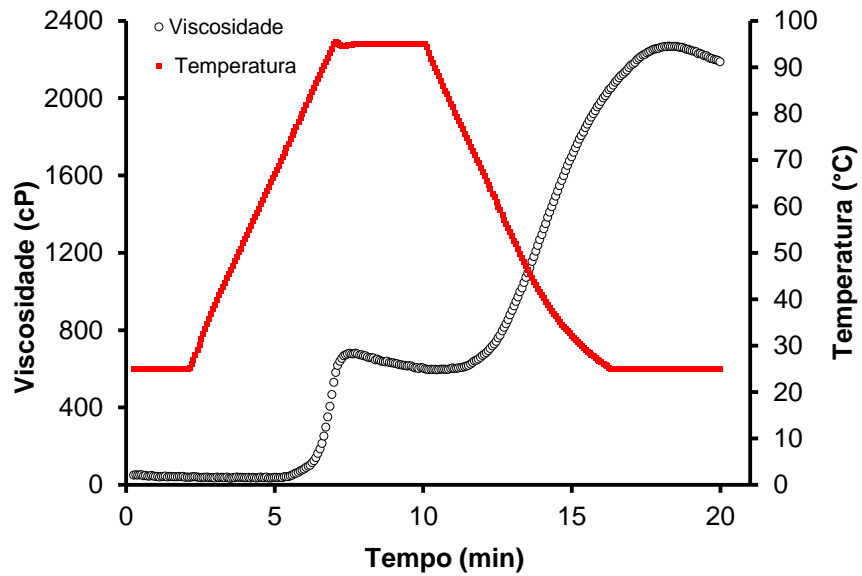
Ensaio 9 – 12

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 500 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 20 \%$



Controle

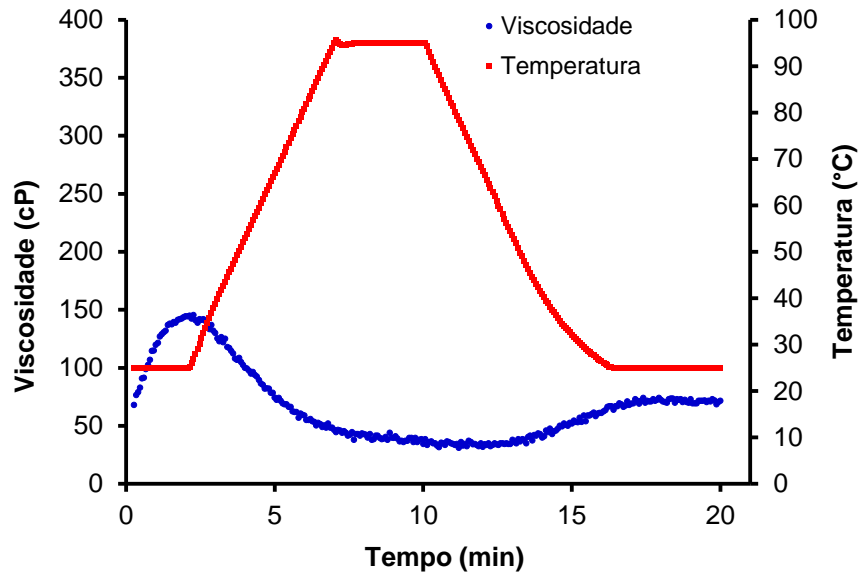
Farinha de sorgo, genótipo BRS310



Anexo AA. Curvas de viscosidade de extrudados do genótipo de sorgo BR700.

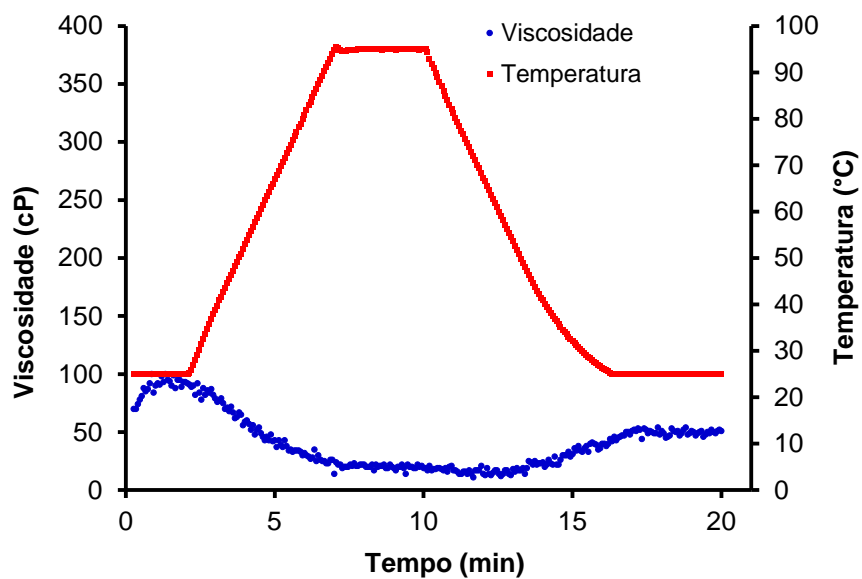
Ensaio 1

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 359 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 15,8 \%$



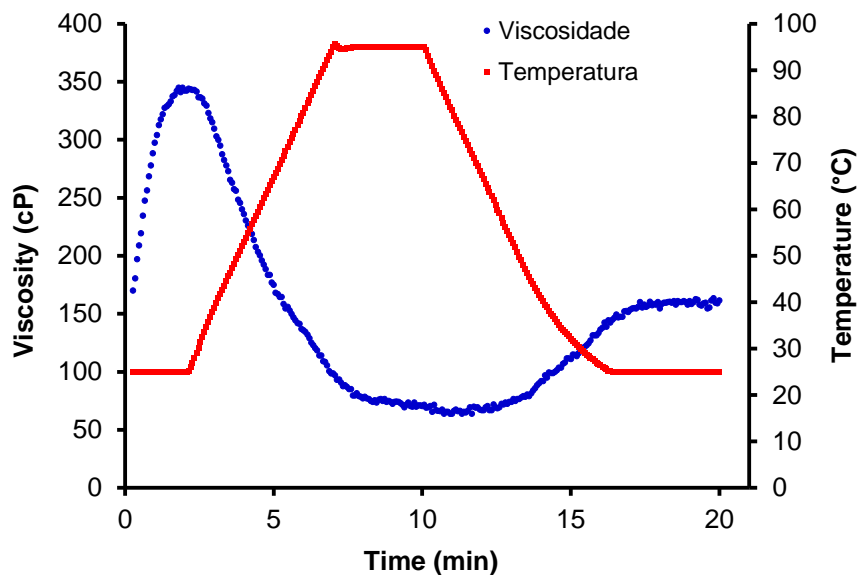
Ensaio 2

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 641 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 15,8 \%$



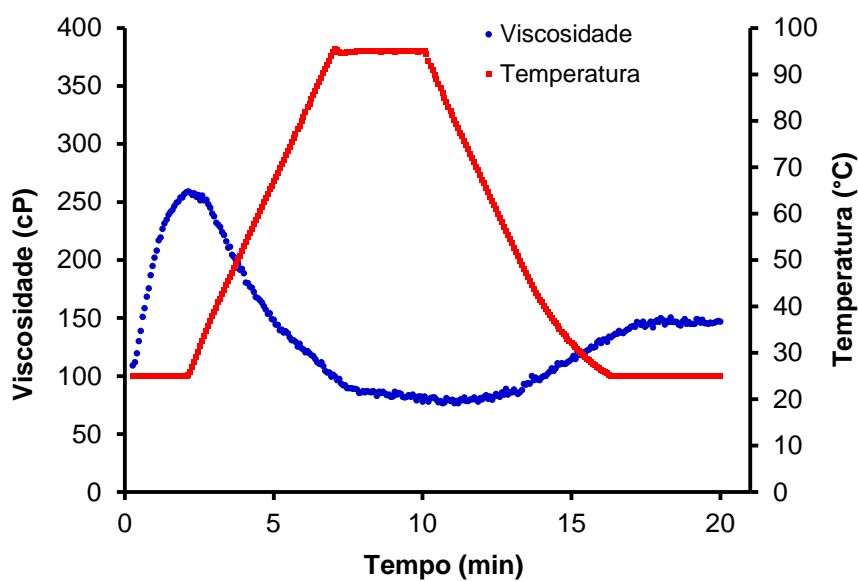
Ensaio 3

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 359 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 24,2 \%$



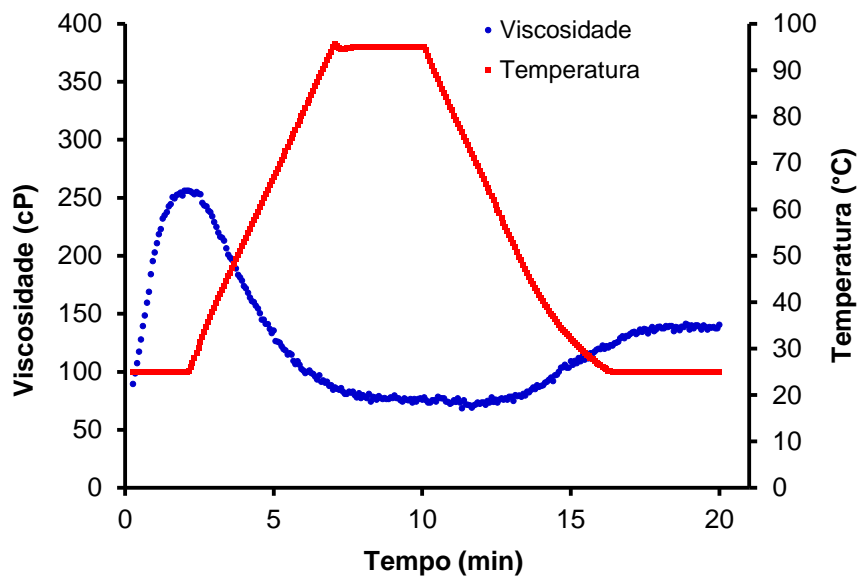
Ensaio 4

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 641 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 24,2 \%$



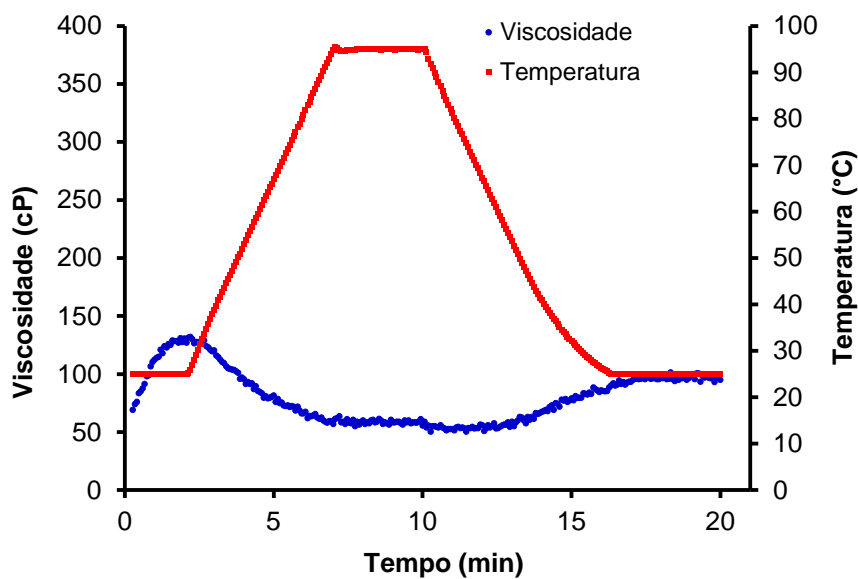
Ensaio 5

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 300 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 20 \%$



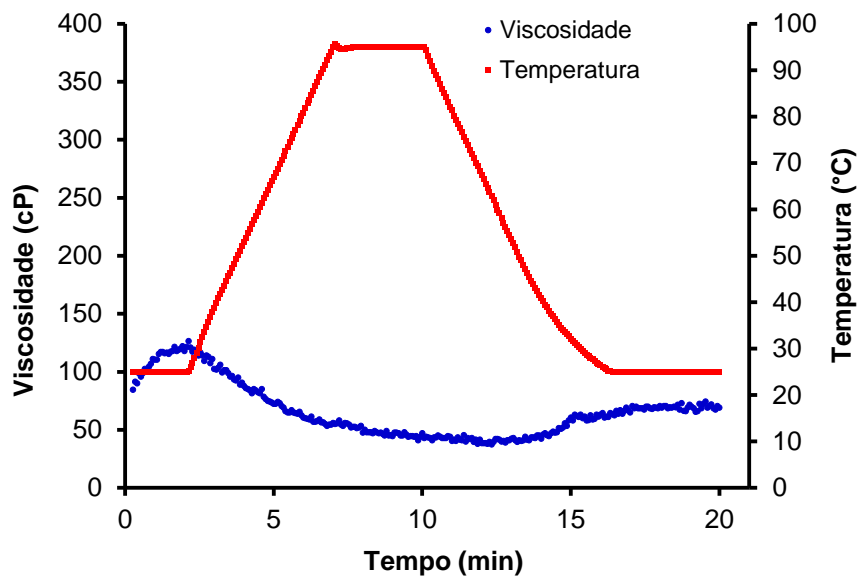
Ensaio 6

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 359 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 15,8 \%$



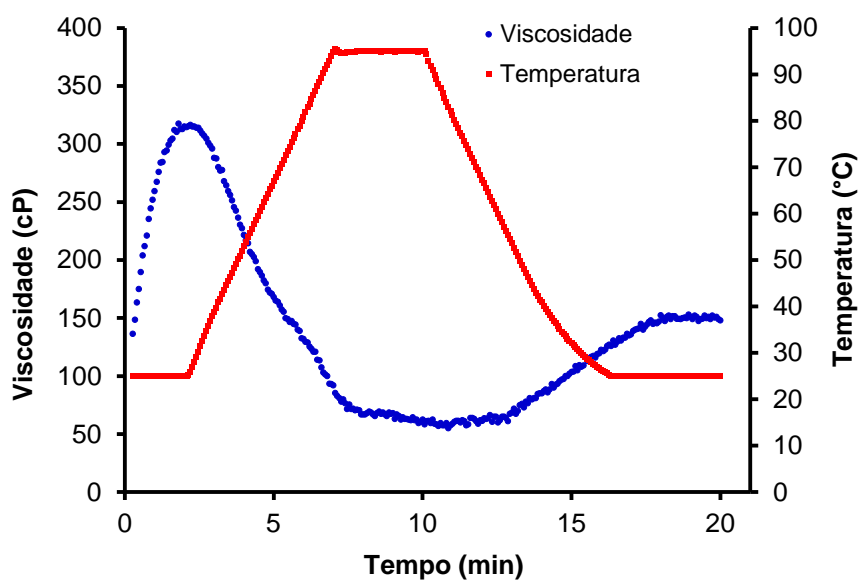
Ensaio 7

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 500 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 14 \%$



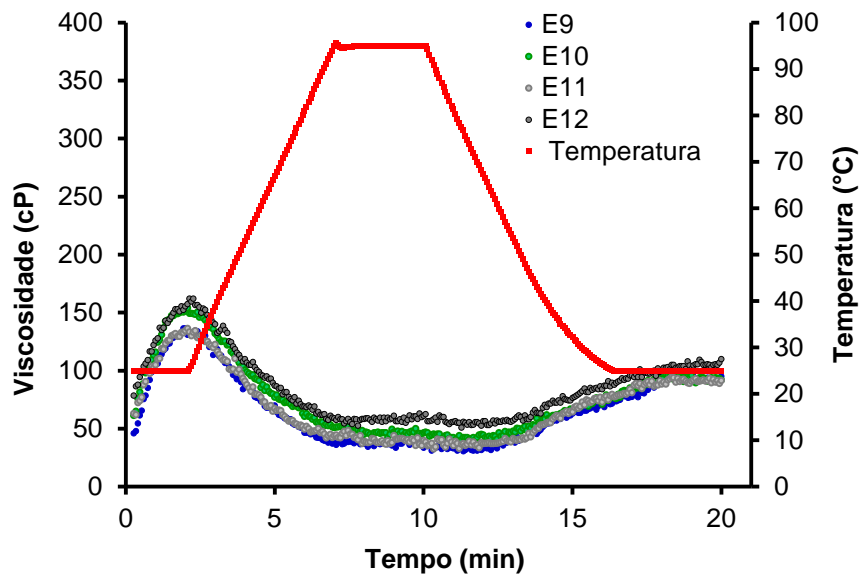
Ensaio 8

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 500 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 26 \%$



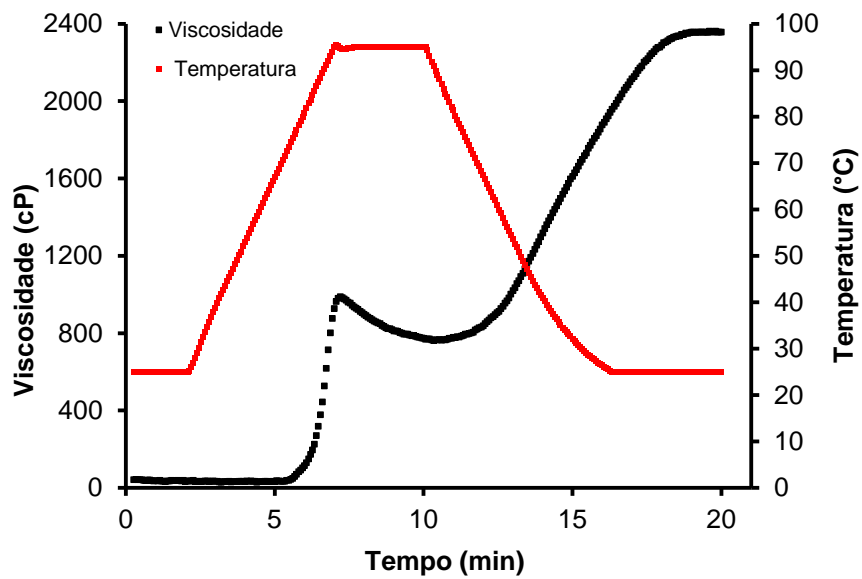
Ensaio 9 – 12

Frequência de rotação dos parafusos, $F = 500 \text{ min}^{-1}$; Umidade de extrusão, $U = 20 \%$



Controle

Farinha de sorgo, genótipo BR700



Anexo AB. Dados registrados pelo software FITSYS Plus do extrusor Clextral Evolum HT25, durante o processo de dois genótipos de sorgo.

Ensaio	F min^{-1}	U %	W ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)		S' ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)		W' ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)		Q ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	
			BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700
1	358.6	15.76	0.19	0.21	8.99 ± 0.07	9.55 ± 0.10	0.15 ± 0.00	0.22 ± 0.02	8.53 ± 0.02	9.13 ± 0.13
2	641.4	15.76	0.19	0.21	9.00 ± 0.08	9.73 ± 0.10	0.15 ± 0.00	0.25 ± 0.04	8.32 ± 0.05	9.29 ± 0.16
3	358.6	24.24	1.22	1.24	9.00 ± 0.09	9.51 ± 0.13	1.16 ± 0.00	1.29 ± 0.04	9.08 ± 0.08	10.48 ± 0.32
4	641.4	24.24	1.22	1.24	9.01 ± 0.09	9.84 ± 0.09	1.07 ± 0.00	1.28 ± 0.00	9.17 ± 0.05	10.34 ± 0.15
5	300	20	0.68	0.70	9.00 ± 0.11	9.65 ± 0.11	0.67 ± 0.00	0.71 ± 0.00	8.73 ± 0.16	10.20 ± 0.54
6	700	20	0.68	0.70	9.00 ± 0.10	9.71 ± 0.08	0.67 ± 0.00	0.71 ± 0.00	8.80 ± 0.10	9.66 ± 0.09
7	500	14	0.01	0.02	8.06 ± 0.09	9.60 ± 0.10	0.89 ± 0.01	0.01 ± 0.01	8.34 ± 0.28	9.30 ± 0.10
8	500	26	1.47	1.49	9.01 ± 0.06	9.58 ± 0.12	1.28 ± 0.00	1.54 ± 0.01	9.36 ± 0.12	10.81 ± 0.22
9	500	20	0.68	0.70	9.02 ± 0.09	9.82 ± 0.11	0.67 ± 0.00	0.67 ± 0.00	8.55 ± 0.19	9.79 ± 0.19
10	500	20	0.68	0.70	9.01 ± 0.09	9.64 ± 0.10	0.76 ± 0.00	0.67 ± 0.00	8.62 ± 0.34	9.86 ± 0.03
11	500	20	0.68	0.70	8.98 ± 0.06	9.68 ± 0.11	0.66 ± 0.08	0.69 ± 0.01	8.63 ± 0.12	9.82 ± 0.19
12	500	20	0.68	0.70	9.01 ± 0.08	9.70 ± 0.12	0.67 ± 0.00	0.68 ± 0.01	8.94 ± 0.04	9.87 ± 0.13

Ensaio	F' (min^{-1})		T (%)		p_g (bar)		T_f ($^{\circ}\text{C}$)	
	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700
1	360.44 ± 0.53	360.34 ± 0.86	25.25 ± 0.71	23.63 ± 0.61	42.20 ± 0.82	35.94 ± 1.28	136.16 ± 0.32	123.88 ± 5.24
2	637.40 ± 1.29	637.58 ± 1.55	23.74 ± 1.75	28.68 ± 1.17	39.94 ± 2.16	46.29 ± 1.31	133.28 ± 1.86	133.67 ± 0.94
3	360.49 ± 0.00	359.14 ± 2.21	18.52 ± 0.42	34.16 ± 3.39	25.98 ± 1.04	46.44 ± 2.98	125.87 ± 5.65	136.85 ± 0.37
4	637.25 ± 0.99	637.26 ± 1.03	17.53 ± 0.46	20.79 ± 0.61	29.10 ± 1.15	35.04 ± 0.53	125.68 ± 3.98	136.94 ± 0.36
5	301.23 ± 0.00	301.23 ± 0.00	21.27 ± 0.37	32.09 ± 1.85	30.26 ± 0.97	39.74 ± 2.04	137.54 ± 0.38	136.56 ± 0.21
6	700.70 ± 1.54	699.95 ± 2.17	19.76 ± 0.51	24.06 ± 0.59	32.25 ± 0.81	39.67 ± 0.56	134.38 ± 0.21	137.75 ± 0.38
7	496.84 ± 2.41	496.52 ± 2.46	25.88 ± 2.38	32.29 ± 1.18	42.96 ± 4.23	43.40 ± 1.17	134.51 ± 1.08	136.57 ± 0.41
8	496.13 ± 2.47	496.30 ± 2.47	16.29 ± 0.43	20.70 ± 0.52	27.12 ± 1.16	32.16 ± 0.62	126.46 ± 3.76	137.08 ± 0.35
9	495.83 ± 2.43	496.60 ± 2.45	21.15 ± 0.42	27.17 ± 0.88	31.81 ± 0.77	40.01 ± 0.87	133.27 ± 0.73	134.21 ± 1.13
10	497.00 ± 2.37	496.55 ± 2.46	20.72 ± 0.62	27.57 ± 0.94	29.61 ± 0.96	38.01 ± 0.65	134.18 ± 0.34	137.45 ± 0.30
11	496.15 ± 2.47	496.75 ± 2.43	20.72 ± 0.48	26.93 ± 0.86	32.61 ± 0.75	38.04 ± 0.68	133.29 ± 0.52	136.63 ± 0.60
12	496.68 ± 2.44	497.04 ± 2.36	20.68 ± 0.41	27.40 ± 1.07	30.86 ± 0.93	37.64 ± 0.92	135.73 ± 0.53	137.28 ± 0.34

F : frequência de rotação dos parafusos; U : umidade de extrusão; W : Taxa de alimentação de água, calculado com a equação (2); S' : taxa de alimentação de sólidos registrado; W' : taxa de alimentação de água registrado; Q : taxa de fluxo mássico, calculado com a equação (3); F' : frequência de rotação dos parafusos registrada; T : torque dos parafusos; p_g : pressão da caixa de engrenagens; T_f : temperatura da massa fundida. BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

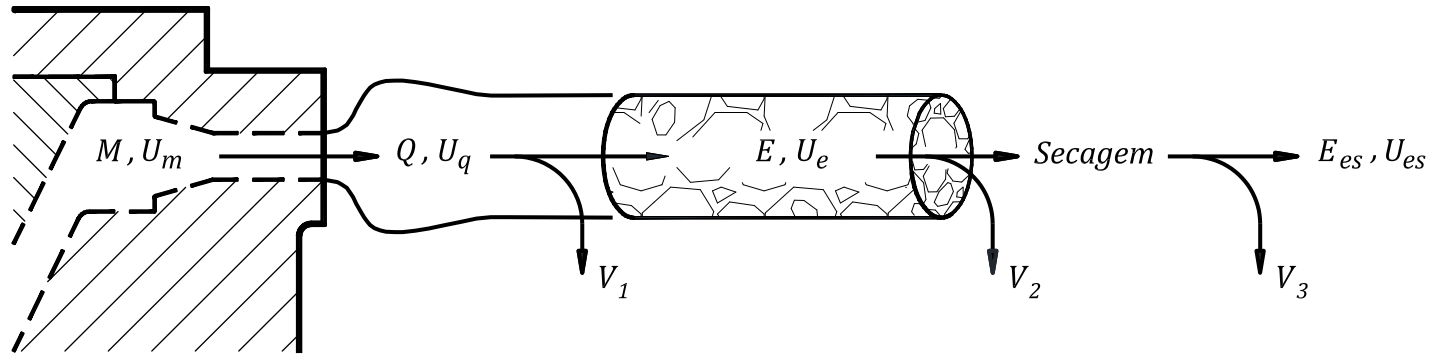
(continuação)

Ensaio	T_{Z1} (°C)		T_{Z2} (°C)		T_{Z3} (°C)		T_{Z4} (°C)		T_{Z5} (°C)	
	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700
1	31.44 ± 0.07	28.70 ± 0.35	29.97 ± 0.34	30.15 ± 0.35	55.56 ± 7.40	67.73 ± 7.61	91.30 ± 0.09	93.21 ± 0.50	99.47 ± 0.23	100.15 ± 0.11
2	33.85 ± 1.37	31.05 ± 0.23	32.21 ± 2.22	45.01 ± 4.25	82.55 ± 6.27	86.13 ± 0.64	91.22 ± 0.17	92.11 ± 0.12	99.30 ± 0.12	100.57 ± 0.11
3	25.63 ± 0.52	29.99 ± 0.31	29.49 ± 0.36	31.15 ± 0.89	74.41 ± 5.22	82.55 ± 1.62	91.12 ± 0.21	92.01 ± 0.06	98.77 ± 0.06	100.38 ± 0.12
4	31.46 ± 1.53	30.32 ± 0.23	37.33 ± 0.63	25.95 ± 0.51	87.22 ± 0.36	81.27 ± 0.32	91.95 ± 0.42	91.31 ± 0.26	99.36 ± 0.08	100.08 ± 0.10
5	31.47 ± 0.13	30.04 ± 0.20	26.79 ± 0.38	29.40 ± 0.40	60.94 ± 0.53	56.64 ± 2.59	91.52 ± 0.12	91.79 ± 0.09	99.66 ± 0.09	100.58 ± 0.12
6	33.14 ± 0.34	30.17 ± 0.26	28.48 ± 1.04	36.49 ± 1.66	83.80 ± 0.29	86.30 ± 0.61	91.21 ± 0.11	91.56 ± 0.12	99.54 ± 0.08	100.19 ± 0.12
7	28.41 ± 0.33	30.11 ± 0.21	29.89 ± 0.32	29.22 ± 0.33	75.30 ± 10.5	83.83 ± 0.25	91.23 ± 0.12	92.02 ± 0.10	99.41 ± 0.25	100.31 ± 0.11
8	29.37 ± 0.53	30.23 ± 0.19	30.23 ± 0.29	27.28 ± 0.38	86.70 ± 0.44	72.42 ± 2.00	92.63 ± 0.44	91.48 ± 0.14	98.98 ± 0.08	100.06 ± 0.08
9	33.81 ± 0.18	30.43 ± 0.37	31.46 ± 2.32	30.57 ± 0.36	85.01 ± 1.00	86.78 ± 1.19	91.40 ± 0.15	91.85 ± 0.09	99.35 ± 0.07	100.12 ± 0.08
10	30.96 ± 0.32	30.11 ± 0.22	29.89 ± 0.33	31.01 ± 3.07	85.51 ± 0.81	82.85 ± 0.86	91.13 ± 0.11	91.78 ± 0.10	99.17 ± 0.06	100.26 ± 0.11
11	33.77 ± 0.43	30.08 ± 0.21	30.16 ± 0.25	29.22 ± 0.30	85.26 ± 0.55	81.84 ± 0.64	91.51 ± 0.19	91.80 ± 0.08	99.50 ± 0.07	100.05 ± 0.08
12	35.61 ± 0.59	30.03 ± 0.23	29.66 ± 1.87	30.21 ± 0.45	82.50 ± 0.79	81.93 ± 0.58	91.16 ± 0.13	91.89 ± 0.10	99.27 ± 0.07	100.17 ± 0.19

Ensaio	T_{Z6} (°C)		T_{Z7} (°C)		T_{Z8} (°C)		T_{Z9} (°C)		T_{Z10} (°C)	
	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700
1	100.75 ± 0.43	101.29 ± 0.45	122.77 ± 1.40	114.78 ± 0.42	125.74 ± 0.92	118.98 ± 0.64	145.80 ± 0.93	141.60 ± 1.13	151.04 ± 1.81	149.16 ± 2.18
2	100.60 ± 0.22	100.63 ± 0.51	116.20 ± 1.61	116.28 ± 0.41	118.44 ± 1.27	118.51 ± 0.60	145.28 ± 1.10	149.37 ± 0.59	153.42 ± 1.99	152.93 ± 1.44
3	100.33 ± 0.11	100.19 ± 0.53	114.22 ± 0.53	121.12 ± 0.25	118.28 ± 0.22	123.11 ± 0.38	134.55 ± 0.66	151.65 ± 0.16	150.81 ± 1.23	150.17 ± 1.71
4	100.67 ± 0.11	100.16 ± 0.48	113.42 ± 0.36	117.08 ± 0.47	117.15 ± 0.18	118.01 ± 0.48	134.15 ± 1.52	143.71 ± 0.73	151.65 ± 1.91	149.29 ± 1.83
5	100.29 ± 0.38	100.53 ± 0.55	119.15 ± 0.26	120.66 ± 0.19	121.81 ± 0.12	122.12 ± 0.73	147.06 ± 0.37	149.25 ± 0.25	148.96 ± 2.09	148.80 ± 2.13
6	101.02 ± 0.09	99.94 ± 0.57	115.94 ± 0.17	118.79 ± 0.29	118.53 ± 0.18	117.15 ± 0.32	142.08 ± 0.65	149.06 ± 0.46	152.46 ± 1.35	151.12 ± 1.31
7	100.54 ± 0.48	100.14 ± 0.52	120.23 ± 2.73	119.85 ± 0.24	123.54 ± 1.96	122.14 ± 0.46	146.66 ± 1.86	153.57 ± 0.38	152.90 ± 2.19	151.66 ± 1.35
8	100.55 ± 0.10	100.10 ± 0.51	113.81 ± 0.29	118.17 ± 0.36	117.16 ± 0.16	120.19 ± 0.36	131.90 ± 1.25	144.25 ± 0.80	149.36 ± 2.43	148.33 ± 2.14
9	100.71 ± 0.08	100.46 ± 0.47	115.51 ± 0.39	116.97 ± 0.21	119.13 ± 0.17	119.51 ± 0.38	143.20 ± 0.27	147.54 ± 0.57	151.80 ± 1.79	150.28 ± 1.63
10	100.51 ± 0.09	100.22 ± 0.55	115.60 ± 0.33	119.53 ± 0.42	118.40 ± 0.33	119.24 ± 0.39	140.63 ± 1.19	151.03 ± 0.65	151.37 ± 1.70	150.83 ± 1.67
11	100.77 ± 0.24	100.08 ± 0.55	115.60 ± 0.28	119.19 ± 0.30	119.07 ± 0.25	119.08 ± 0.48	145.51 ± 0.52	149.73 ± 0.51	150.99 ± 1.73	149.94 ± 1.73
12	100.61 ± 0.11	99.91 ± 0.56	117.25 ± 0.34	119.56 ± 0.38	118.92 ± 0.36	118.99 ± 0.49	145.31 ± 0.92	150.51 ± 0.39	150.49 ± 1.60	150.39 ± 1.60

T_{zi} : Temperaturas das zonas modulares 1 até 10; BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.

Anexo AC. Cálculos de balance de massa durante o processo de extrusão de dois genótipos de sorgo.



$$Q_s = (S' + W') \times \left(\frac{100 - U_m}{100} \right) \quad (24)$$

$$U_q = \frac{100Q - S' \times (100 - U_s)}{Q} \quad (25)$$

$$V_1 = S' + W' - Q \quad (26)$$

$$V_2 = \frac{Q \times (U_q - U_e)}{100 - U_e} \quad (27)$$

$$V_3 = \frac{Q \times (100 - U_q) \times (U_e - U_{es})}{(100 - U_e) \times (100 - U_{es})} \quad (28)$$

Ensaio	U_m (%)		Q_s (kg·h ⁻¹)		U_q (%)		U_e (%)		U_{es} (%)	
	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700
1	15.35	15.72	7.74	8.23	9.31	9.83	7.76 ± 0.04	9.23 ± 0.35	5.80 ± 0.11	6.63 ± 0.18
2	15.35	15.94	7.75	8.39	9.56	9.68	7.64 ± 0.07	8.91 ± 0.08	5.66 ± 0.06	6.72 ± 0.02
3	23.76	24.08	7.75	8.20	14.73	21.76	7.90 ± 0.01	15.14 ± 0.23	5.47 ± 0.03	7.91 ± 0.02
4	23.07	23.70	7.75	8.48	15.46	17.98	8.05 ± 0.06	13.77 ± 0.12	5.72 ± 0.11	7.81 ± 0.18
5	19.90	19.69	7.75	8.32	11.25	18.43	7.73 ± 0.09	11.64 ± 0.03	5.65 ± 0.13	7.24 ± 0.21
6	19.90	19.65	7.75	8.37	12.02	13.30	7.93 ± 0.12	11.01 ± 0.01	5.41 ± 0.01	6.89 ± 0.01
7	14.22	13.87	7.74	8.28	8.28	11.00	7.47 ± 0.11	9.84 ± 0.11	6.01 ± 0.03	7.33 ± 0.02
8	24.64	25.72	7.75	8.26	17.14	23.58	7.49 ± 0.04	14.51 ± 0.02	5.22 ± 0.13	8.52 ± 0.18
9	19.89	19.29	7.76	8.47	9.61	13.50	7.80 ± 0.02	11.47 ± 0.06	4.77 ± 0.04	7.34 ± 0.04
10	20.63	19.38	7.75	8.31	10.00	15.70	7.86 ± 0.08	11.44 ± 0.03	4.93 ± 0.04	7.37 ± 0.10
11	19.83	19.52	7.73	8.35	10.42	15.01	7.81 ± 0.05	11.26 ± 0.03	4.89 ± 0.06	7.19 ± 0.01
12	19.89	19.43	7.75	8.36	11.70	15.25	7.75 ± 0.02	11.37 ± 0.06	4.79 ± 0.03	7.34 ± 0.17

Ensaio	V_1 (kg·h ⁻¹)		V_2 (kg·h ⁻¹)		V_3 (kg·h ⁻¹)		$V_1 + V_2$ (kg·h ⁻¹)		V (kg·h ⁻¹)	
	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700	BRS310	BR700
1	0.61	0.64	0.14	0.06	0.24	0.25	0.75	0.70	0.99	0.95
2	0.59	0.69	0.18	0.08	0.20	0.22	0.76	0.77	0.96	0.99
3	1.08	0.32	0.67	0.82	0.72	0.76	1.75	1.14	2.47	1.90
4	0.91	0.78	0.74	0.50	0.58	0.64	1.65	1.28	2.23	1.92
5	0.94	0.16	0.33	0.78	0.42	0.45	1.27	0.94	1.69	1.39
6	0.87	0.76	0.39	0.25	0.38	0.42	1.26	1.01	1.64	1.43
7	0.58	0.31	0.07	0.12	0.23	0.25	0.66	0.43	0.89	0.68
8	0.93	0.31	0.98	1.15	0.59	0.63	1.91	1.46	2.50	2.09
9	1.10	0.70	0.17	0.23	0.39	0.42	1.27	0.93	1.66	1.35
10	1.15	0.45	0.20	0.49	0.38	0.42	1.35	0.94	1.74	1.37
11	1.01	0.55	0.24	0.40	0.39	0.42	1.26	0.95	1.65	1.38
12	0.90	0.51	0.38	0.50	0.39	0.34	1.28	1.01	1.67	1.35

U_m : umidade da massa entrando à matriz, calculado com a equação (9); Q_s : taxa de fluxo mássico de sólidos secos, calculado com a equação (24); U_q : umidade do extrudado à saída da matriz, calculado com a equação (25); U_e : umidade do extrudado recentemente processado; U_{es} : umidade do extrudado após o processo de secagem e moagem.

V_i : taxa de fluxo parcial de vapor liberado, calculado com as equações (26), (27) e (28); V : taxa de fluxo total de vapor liberado.

BRS310 e BR700: genótipos de sorgo de baixo e alto teor de taninos, respectivamente.