



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de São José do Rio Preto

JEFFERSON HENRIQUE TIAGO BARROS

FIBRAS ALIMENTARES: EFEITO NA FARINHA, REOLOGIA
DAS MASSAS, QUALIDADE E TAXA DE ENVELHECIMENTO
DE PÃES

São José do Rio Preto - SP
Março/2015

JEFFERSON HENRIQUE TIAGO BARROS

FIBRAS ALIMENTARES: EFEITO NA FARINHA, REOLOGIA
DAS MASSAS, QUALIDADE E TAXA DE ENVELHECIMENTO
DE PÃES

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração - Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Célia Maria Landi Franco

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Vânia Regina Nicoletti
Telis

São José do Rio Preto - SP
Março/2015

Barros, Jefferson Henrique Tiago.

Fibras alimentares : efeito na farinha, reologia das massas, qualidade e taxa de envelhecimento de pães / Jefferson Henrique Tiago Barros. -- São José do Rio Preto, 2015

106 f. : il., tabs.

Orientador: Célia Maria Landi Franco

Coorientador: Vânia Regina Nicoletti Telis

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Tecnologia de alimentos. 2. Reologia. 3. Alimentos - Qualidade. 4. Pão - Deterioração. 5. Inulina. 6. Amido. I. Franco, Célia Maria Landi. II. Telis, Vânia Regina Nicoletti. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. IV. Título.

CDU – 664:532.135

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do IBILCE
UNESP - Câmpus de São José do Rio Preto

JEFFERSON HENRIQUE TIAGO BARROS

**FIBRAS ALIMENTARES: EFEITO NA FARINHA, REOLOGIA
DAS MASSAS, QUALIDADE E TAXA DE ENVELHECIMENTO
DE PÃES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração - Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Célia Maria Landi Franco
UNESP – São José do Rio Preto
Orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Maria Teresa Pedrosa Silva Clerici
UNICAMP – Campinas
Membro da Banca

Prof^ª. Dr^ª. Ana Carolina Conti e Silva
UNESP – São José do Rio Preto
Membro da Banca

São José do Rio Preto
Março/2015

Dedico:

A minha mãe, Joaquina Tiago de Barros
A meu pai, Gerson Silva de Barros
Aos meus irmãos, Gerson Tiago e Jéssica
Minha avó, Almelinda
Aos meus sobrinhos, Miguel Henrique, Ester e Sara
Aos meus amigos e colegas na Unesp
A minha orientadora, Célia Maria Landi Franco

A essas pessoas, todo meu carinho e gratidão, **MUITO OBRIGADO!**

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Prof^a. Dr^a Célia Maria Landi Franco pela dedicação e importante participação na realização deste trabalho.

À minha co-orientadora Prof^a. Dr^a Vânia Regina Nicoletti Telis pela atenção e importante contribuição na realização deste trabalho.

À Prof^a. Dr^a. Ana Carolina Conti e Silva - Unesp pelas importantes considerações e ajuda durante a elaboração desse trabalho.

À Profa. Dra. Maria Teresa Pedrosa Silva Clerici e à técnica Alessandra Silva Coelho da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP pela concessão de equipamentos, auxílio na parte experimental e importante contribuição ao projeto.

À Fapesp pela concessão da bolsa de mestrado e o apoio financeiro à pesquisa.

À *Ingredion* e a *Clariant* pela doação das fibras.

As colegas Marina, Flávia, Jaqueline, e em especial a Ana Karla e a Mariana pelo apoio, aprendizado e companheirismo.

Aos laboratórios de Análise Sensorial, Medidas Físicas e Secagem da Unesp pela utilização de equipamentos e ajuda.

Ao laboratório CMMicro - Centro Multiusuário de Microscopia e Microanálises pela realização das análises microscópicas.

Aos técnicos da Unesp, Alana, Ginaldo, Luís e Gesuíno pela ajuda e atenção.

Aos meus amigos e colegas da Unesp que participaram e ajudaram na concretização dessa etapa na minha vida.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram na execução deste trabalho.

RESUMO

Neste estudo, o efeito da inulina de média polimerização (IMP) e do amido resistente (AR) nas características reológicas das massas, qualidade e taxa de envelhecimento de pães foram investigados. Farinha de trigo substituída em diferentes concentrações (0; 5; 7,5 e 10%) de IMP e (0; 10; 15 e 20%) de AR foram analisadas usando farinógrafo, extensógrafo, alveógrafo, viscoanalisador rápido (RVA), calorímetro diferencial de varredura (DSC) e reômetro. Pães com diferentes concentrações de IMP e AR foram produzidos e armazenados por até 10 dias em temperatura ambiente. O volume específico dos pães frescos foi determinado e, durante o armazenamento, a umidade e atividade de água da crosta e miolo, firmeza, retrogradação (DSC), cor e difracção de raios-X do miolo dos pães foram avaliados. IMP promoveu aumento no tempo de hidratação da farinha, reduzindo a absorção de água em 11, 8,6 e 5,2%, respectivamente, quando 5, 7,5 e 10% de fibra foram utilizadas, o que causou aumento no tempo de desenvolvimento e na estabilidade da massa. A resistência à extensão e o valor D aumentaram, mas os resultados alveográficos mostraram que a fibra diluiu a rede de glúten, reduzindo gradualmente a força da massa que atingiu $53,3 \times 10^{-4}$ J. IMP não causou alteração na temperatura de pasta, porém diminuiu a viscosidade do amido e aumentou o ΔH_{ret} indicando maior taxa de retrogradação da amilopectina. Os módulos G' e G'' nas massas controle e com 7,5% de IMP foram semelhantes. O índice de consistência (k) indicou massas mais consistentes a partir da utilização de 7,5% de IMP, provavelmente devido as interações, inulina-glúten, inulina-amido e inulina-inulina. Micrografias obtidas em microscópio confocal de varredura a laser (MCVL) mostraram uma rede de glúten menos homogênea na presença de IMP. As massas com 5 e 7,5% de IMP apresentaram volume similar ao da massa controle durante a fermentação, mas não suportaram a pressão dos gases durante o forneamento, reduzindo o volume específico. Durante o armazenamento, houve migração de água do miolo para crosta, independente da concentração de IMP, a cor e luminosidade do miolo não foram alteradas, mas em altas concentrações de IMP a crosta mostrou-se mais escura. O número de Avrami (n) aumentou com 5% de IMP seguido uma redução com o aumento da concentração de IMP, ao contrário do que ocorreu com a constante (k), indicando aumento da taxa de retrogradação. A cristalinidade dos pães e a firmeza aumentaram com o uso de IMP, com exceção da amostra com 7,5% de IMP. Todos os pães com IMP tiveram teores de fibra acima de 3g/100g, sendo considerados alimentos fonte de

fibras segundo a legislação vigente. Apesar da IMP enfraquecer a farinha e contribuir para a taxa de envelhecimento dos pães, a farinha utilizada foi forte o suficiente para produzir pães com até 7,5% de IMP com qualidade muito semelhante a do pão controle. O AR causou substancial aumento na absorção de água da farinha e o tempo de desenvolvimento, estabilidade e elasticidade diminuíram com o aumento da concentração de AR. A extensibilidade praticamente não foi alterada, com exceção das massas com 20% de AR. A relação P/L (tenacidade/extensibilidade) aumentou com o aumento da concentração de AR atingindo 3,99 com 20%. A força das misturas farinha-AR diminuiu quando 10 e 15% de AR foram adicionadas e aumentou com 20% de AR. O AR, independente da concentração, não afetou a temperatura de pasta da farinha, mas diminuiu gradativamente a viscosidade de pasta e a tendência à retrogradação. O AR não interferiu nas temperaturas iniciais e de pico do complexo amilose-lipídeo, mas a temperatura final e a entalpia aumentaram. A taxa de retrogradação das amostras com AR não diferiu significativamente do controle. Os resultados mostraram que o AR diluiu a farinha enfraquecendo-a. O AR reduziu levemente a consistência do gel e propiciou G' e G'' menores que aqueles da massa controle. Uma rede de glúten menos homogênea pôde ser visualizada nas micrografias de MCVL. A redução no volume das massas com AR ocorreu de forma aleatória, sendo a concentração de 20% a mais deletéria, mas a adição de 15% de AR não interferiu na estrutura da massa possibilitando um volume específico semelhante ao controle. Houve migração de umidade do miolo para a crosta em todas as amostras, mas os pães com AR apresentaram maior teor de umidade durante todo o armazenamento. A cor do miolo não foi alterada, mas a da crosta foi mais clara para os pães com AR. O número de Avrami (n) aumentou com o aumento no teor de AR, e a constante (k) indicou taxa de retrogradação mais lenta para os pães com AR. A cristalinidade do amido no miolo dos pães aumentou com a concentração de AR, mas a firmeza dos pães foi menor que a do pão controle, durante o armazenamento com exceção da amostra com 20% de AR. Todos dos pães com AR podem ser considerados fontes de fibra, sendo aqueles com 15 e 20% considerados como alto conteúdo de fibras ($> 6\text{g}/100\text{g}$). O AR agiu como uma fibra inerte que diluiu a farinha e enfraqueceu a massa, mas a utilização de uma farinha forte possibilitou a obtenção de pães com qualidade semelhante as do controle quando até 15% de AR foi utilizado, atuando positivamente na taxa de envelhecimento dos pães.

Palavras-chaves: Reologia, qualidade, inulina, amido resistente, taxa de envelhecimento.

ABSTRACT

In this study the effect of the average polymerization inulin (API) and resistant starch (RS) in the rheological characteristics of the dough, quality and bread staling were investigated. Wheat flour replaced with different concentrations (0, 5, 7.5 and 10%) of API (0, 10, 15 and 20%) of RS were analyzed using farinograph, extensograph, alveograph, rapid visco analyzer (RVA), differential scanning calorimetry (DSC) and rheometer. Breads with different concentrations of API and RS were produced and stored for up to 10 days at room temperature. The specific volume of fresh breads was determined and during storage the moisture and water activity of the crust and crumb, firmness, retrogradation (DSC), color, and diffraction of X-rays of the crumb of bread were evaluated. API promoted an increase in the time of hydration of the flour, reducing the water absorption to 11, 8.6 and 5.2%, respectively, when 5, 7.5 and 10% fiber were used, which caused an increase in the development time and stability of the dough. The resistance to extension and the D value increased, but the results alveográficos showed that fiber diluted gluten network, gradually reducing the strength of the dough reaching 53.3×10^{-4} J. API caused no changes in the paste temperature, but decreased the starch viscosity and increased ΔH_{ret} indicating higher retrogradation rate of amylopectin. The modulus G' and G'' in the control dough and in the dough with 7.5% API were similar. The consistency index (k) showed more consistent mass from the use of API 7.5% probably due to interaction inulin-gluten, starch-inulin and inulin-inulin. Micrographs in confocal laser scanning microscopy (CLSM) showed a less homogeneous gluten network in the presence of API. The dough with 5% API and 7.5 showed similar volume of the control dough during fermentation, but did not stand the pressure of the gases during baking, reducing the specific volume. During storage, there was a migration of water from the crumb to the crust, independent of the concentration of API, the color and the luminosity crumb were not changed, but in higher concentrations of API, the crust was darker. The Avrami number (n) increased with 5% API followed by a decrease due to the increase in the concentration of API, contrary to what happened with the constant (k), indicating increased retrogradation rate. The crystallinity of the breads and the firmness increased with the use of the API, with the exception of the sample with 7.5% API. All breads with API had fiber contents above 3g / 100g, being considered fiber-rich foods according to current legislation. Despite the API weaken the flour and contribute to the bread staling, the

flour used was strong enough to produce breads up to 7.5% of API with very similar quality to bread control. The RS caused a substantial increase in water absorption of the flour and development time, stability and elasticity decreased due to increased concentrations of RS. The extensibility was not practically changed, except for the dough with 20% RS. The P/L ratio (tenacity / extensibility) increased due to increased concentrations of RS reaching 3.99 to 20%. The strength of mixture flour-RS decreased when 10 and 15% RS were added and increased with 20% of RS. The RS, independent of its concentration, did not affect the flour paste temperature, but gradually decreased the paste viscosity and the tendency to retrogradation. The RS did not interfere in the initial temperatures and peak of amylose-lipid complex, but the final temperature and the enthalpy increased. The retrogradation rate of the samples with RA did not differ significantly from control. The results showed that the RS diluted the flour weakening it. The RS slightly reduced gel consistency and provided G' and G'' smaller than the control dough. A less homogeneous gluten network could be visualized by CLSM micrographs. The reduced dough volume of RS occurred randomly, being the 20% concentration the most deleterious, but the addition of 15% RS did not affect the structure of the dough allowing a specific volume similar to the control. There was moisture migration from the crumb to crust in all samples, but the bread with RS showed higher moisture content during storage. The crumb color was not changed, but the crust was clearer for breads with RS. The Avrami number (n) increased due to an increase in the RS content, and the constant (k) showed slower rate of retrogradation for the bread with RS. The crystallinity of the starch in the crumb of the bread increased due to the concentration of RS but the firmness of breads was lower than the control bread during storage with the exception of the sample with 20% of RS. All the breads with RS can be considered sources of fiber, and those with 15 and 20% can be considered as high fiber content ($> 6 \text{ g} / 100\text{g}$) by current legislation. The RS acted as an inert fiber that diluted the flour and weakened the dough, but the use of a strong flour made it possible to get similar quality breads to the control when up to 15% of RS was used, acting positively in the bread staling.

Keywords: Rheology, quality, inulin, resistant starch, staling.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVO	19
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. PÃES	19
3.1.1 Farinha de trigo	20
3.1.1.1 <i>Amido</i>	20
3.1.1.2 <i>Amilases</i>	22
3.1.1.3 <i>Proteínas</i>	23
3.1.1.4 <i>Lipídeos</i>	24
3.1.1.5 <i>Carboidratos não amiláceos</i>	24
3.2. ENVELHECIMENTO DO PÃO	25
3.3. FIBRA ALIMENTAR	27
3.3.1. Inulina	28
3.3.2. Amido Resistente (AR)	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1. MATERIAL	32
4.2. MÉTODOS	33
4.2.1. Caracterização da farinha de trigo	33
4.2.1.1 <i>Composição química da farinha de trigo</i>	33
4.2.1.2 <i>Teor de glúten e cor da Farinha</i>	33
4.2.2. Propriedades reológicas e térmicas da farinha de trigo sem e com fibras	33
4.2.2.1 <i>Propriedades farinográficas</i>	33
4.2.2.2 <i>Propriedades extensográficas</i>	34
4.2.2.3 <i>Propriedades Alveográficas</i>	34
4.2.2.4 <i>Propriedade de pasta</i>	34
4.2.2.5 <i>Propriedades térmicas</i>	35
4.2.3 Ensaios reológicos oscilatórios	35
4.2.4 Microscopia confocal de varredura a laser	36
4.2.5. Produção do Pão	37
4.2.6. Avaliação tecnológica e envelhecimento do pão	37

4.2.6.1. Avaliação do volume e pH da massa.....	37
4.2.6.2. Avaliação do volume específico dos pães.	38
4.2.6.3.. Umidade do miolo e da crosta dos pães.....	38
4.2.6.4. Atividade de água do miolo e da crosta dos pães.	38
4.2.6.5. Análise de cor do miolo e crosta dos pães	39
4.2.6.6 Propriedades térmicas do miolo dos pães.....	39
4.2.6.7 Padrão de difração de raios-X.....	39
4.2.6.8 Firmeza do miolo do pão.....	40
4.2.7 Teor de fibras solúveis no pão.....	40
4.2.8 Teor de AR no pão.....	41
4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA DE TRIGO.....	41
5.1.1. Composição química da farinha de trigo	41
5.1.2. Teor de glúten e cor da farinha de trigo.....	42
5.2. EFEITO DA INULINA NA FARINHA, REOLOGIA DAS MASSAS, QUALIDADE E TAXA DE ENVELHECIMENTO DE PÃES.....	43
5.2.1. Parâmetros reológicos e térmicos da farinha de trigo sem e com IMP.....	43
5.2.1.1. Parâmetros farinográficos, extensográficos e alveográficos da farinha de trigo sem e com IMP	43
5.2.1.2 Propriedades de pasta da farinha de trigo sem e com IMP.....	47
5.2.1.3 Parâmetros térmicos da farinha de trigo sem e com IMP	48
5.2.2 Ensaios reológicos oscilatórios da massa sem e com IMP	50
5.2.3 Microscopia confocal de varredura a laser das massas com e sem IMP	56
5.2.4 Avaliação tecnológica e estudo de envelhecimento.....	57
5.2.4. 1 Volume e pH das massas sem e com IMP.....	57
5.2.4.2 Volume específico dos pães sem e com IMP.....	58
5.2.4.3 Umidade e atividade de água dos pães sem e com IMP.....	59
5.2.4.4 Cor do miolo e crosta do pão.....	62
5.2.4.5 Propriedades térmicas do miolo dos pães com e sem IMP.....	64
5.2.4.6 Padrão de raios-x e cristalinidade relativa do miolo dos pães com e sem IMP.....	66
5.2.4.7 Firmeza do miolo do pão com e sem IMP.....	68
5.2.4.8 Teor de fibras no pão com e sem IMP.....	69

5. 3 EFEITO DO AR NA FARINHA, REOLOGIA DAS MASSAS, QUALIDADE E TAXA DE ENVELHECIMENTO DE PÃES.....	71
5.3.1 Parâmetros reológicos e térmicos da farinha de trigo sem e com AR.....	71
5.3.1.1 <i>Parâmetros farinográficos, extensográficos e alveográficos da farinha de trigo sem e com AR.....</i>	<i>71</i>
5.3.1.2 <i>Propriedades de pasta da farinha de trigo sem e com AR.....</i>	<i>75</i>
5.3.1.3 <i>Propriedades térmicas da farinha de trigo sem e com AR.....</i>	<i>76</i>
5.3.2 Ensaio reológico oscilatório da massa sem e com AR.....	78
5.3.3 Microscopia confocal de varredura a laser das massas com e sem AR.....	82
5.3.4 Avaliação tecnológica e estudo de envelhecimento.....	84
5.3.4.1 <i>Volume e pH das massa sem e com AR.....</i>	<i>84</i>
5.3.4.2 <i>Volume específico dos pães sem e com AR.....</i>	<i>84</i>
5.3.4.3 <i>Umidade e atividade de água dos pães sem e com AR.....</i>	<i>86</i>
5.3.4.4 <i>Cor do miolo e crosta do pão.....</i>	<i>88</i>
5.3.4.5 <i>Propriedades térmicas do miolo dos pães com e sem AR.....</i>	<i>91</i>
5.3.4.6 <i>Padrão de raios-X e cristalinidade relativa do miolo dos pães com e sem AR.....</i>	<i>93</i>
5.3.4.7 <i>Firmeza do miolo do pão.....</i>	<i>95</i>
5.3.4.8 <i>Teor de AR nos pães.....</i>	<i>96</i>
6. CONCLUSÃO.....	97
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da gelatinização e da retrogradação do amido (I) Grânulos de amido nativo; (IIa) Inchamento dos grânulos; (IIb) amilose lixiviada e rompimento dos grânulos; (IIIa) Retrogradação da amilose; (IIIb) Retrogradação da amilopectina.....	22
Figura 2 – Representação esquemática da estrutura do glúten.....	23
Figura 3 – Processo de retrogradação do amido.....	26
Figura 4 – Cadeias de fruto-oligosacarídeos com (a) e sem (b) glicose na extremidade. n = número de frutose.	29
Figura 5 – Região de viscoelasticidade linear das massas controle e com 10% IMP nas frequências de (a) 1 rad/s e (b) 10 rad/s.....	51
Figura 6 – a) Módulos de armazenamento, G' (símbolos fechados), e módulo de dissipação, G'' (símbolos abertos), para as amostras de massas de pães nas concentrações de 0 (■, □); 5% (●, ○); 7,5(▲, △) e 10% (◀, ◁) de IMP. b) módulo complexo, G^* (■); 5% (●); 7,5(▲) e 10% (◀) de IMP. Quantidade de água e tempo de desenvolvimento ideal para cada amostra.	52
Figura 7 – a) Módulos de armazenamento, G' (símbolos fechados), e módulo de dissipação, G'' (símbolos abertos), para as amostras de massas de pães nas concentrações de 0 (■, □); 5% (●, ○); 7,5(▲, △) e 10% (◀, ◁) de IMP. b) módulo complexo, G^* (■); 5% (●); 7,5(▲) e 10% (◀) de IMP. Quantidade de água e tempo de desenvolvimento fixos.....	53
Figura 8 – Tangente do ângulo de fase (δ) para géis nas concentrações de 0 (■); 5% (○); 7,5(▲) e 10% (◁) de IMP. a) Quantidade de água e tempo de desenvolvimento ideal para cada amostra; b) Quantidade de água e tempo de desenvolvimento fixos.	54
Figura 9 – Micrografias das massas de pão obtidas em microscópio de varredura a laser confocal em 3D: a) massa controle; b) massa com 7,5% de IMP. verde: grânulos de amido; vermelho: proteínas.....	56
Figura 10 – Características internas dos pães com e sem IMP.....	59
Figura 11 – Teor de umidade do miolo (símbolos fechados) e da crosta (símbolos abertos) dos pães sem e com IMP durante armazenamento.....	60
Figura 12 – Atividade de água do miolo (símbolos fechados) e da crosta (símbolos abertos) dos pães sem e com IMP.....	61

Figura 13 – Entalpia de retrogradação da amilopectina no miolo dos pães sem e com IMP durante armazenamento.....	65
Figura 14 – Padrão de difração de raios-X e cristalinidade relativa do miolo dos pães sem e com IMP, frescos e armazenados. I) Controle; II) 5% IMP; III) 7,5% IMP; IVd) 10% IMP. a: pães frescos; b: 10 dias de armazenamento.....	67
Figura 15 – Firmeza (N) dos pães sem e com IMP durante o período de armazenamento.....	69
Figura 16 – Região de viscoelasticidade linear das massas controle e com 20% de AR nas frequências de (a) 1 rad/s e (b) 10 rad/s.....	78
Figura 17 – a) Módulos de armazenamento, G' (símbolos fechados), e módulo de dissipação, G'' (símbolos abertos), para as amostras de massas de pães com 0 (■, □); 10% (●, ○); 15(▲, Δ) e 20% (◄, ◁) de AR. b) módulo complexo, G^* : 0 (■), 10% (●), 15(▲) e 20% (◄) de AR. Quantidade de água e tempo de desenvolvimento ideal para cada amostra.....	79
Figura 18 – a) Módulos de armazenamento, G' (símbolos fechados), e módulo de dissipação, G'' (símbolos abertos), para as amostras de massas de pães nas concentrações de 0 (■, □), 10% (●, ○), 15(▲, Δ) e 20% (◄, ◁) de AR. b) módulo complexo, G^* : 0 (■), 10% (●), 15% (▲) e 20% (◄) de AR. Quantidade de água e tempo de desenvolvimento fixos.....	80
Figura 19 – Tangente do ângulo de fase (δ) para massas nas concentrações de 0 (■); 10% (○); 15(▲) e 20% (◁) de AR. a) Quantidade de água e tempo de desenvolvimento ideal para cada amostra; b) Quantidade de água e tempo de desenvolvimento fixos.....	81
Figura 20 – Micrografias das massas de pão obtidas em microscópio de varredura a laser confocal em 3D: a) massa controle; b) massa com 15% de AR. verde: grânulos de amido; vermelho: proteínas.....	83
Figura 21 – Características internas dos pães com e sem AR.....	86
Figura 22 – Teor de umidade do miolo (símbolos fechados) e da crosta (símbolos abertos) dos pães sem e com AR durante armazenamento.....	87
Figura 23 – Atividade de água do miolo (símbolos fechados) e da crosta (símbolos abertos) dos pães sem e com AR durante armazenamento.....	88
Figura 24 – Entalpia de retrogradação da amilopectina no miolo dos pães com e sem AR durante armazenamento.....	92
Figura 25 – Padrão de difração de raios-X do amido resistente (AR) e da farinha de trigo...	93

Figura 28 – Padrão de difração de raios-X e cristalinidade relativa do miolo dos pães controle e com AR. I) Controle; II) 10% AR; III) 15% AR; IV) 20% AR. a: pães frescos; b: 10 dias de armazenamento.....	94
Figura 29 – Firmeza (N) dos pães sem e com AR durante o período de armazenamento.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da farinha de trigo	42
Tabela 2 – Teores de glúten e cor instrumental da farinha de trigo	43
Tabela 3 – Parâmetros farinográficos da farinha de trigo controle e com IMP.....	44
Tabela 4 – Parâmetros extensográficos da farinha de trigo controle e com IMP durante diferentes tempos de descanso.	46
Tabela 5 – Parâmetros alveográficos da farinha de trigo controle e com IMP.....	47
Tabela 6 – Parâmetros viscoamilográficos das amostras de farinha com e sem IMP.	48
Tabela 7 – Parâmetros térmicos de gelatinização da farinha de trigo e formação do complexo amilose-lipídeo sem e com IMP.	49
Tabela 8 – Parâmetros térmicos de retrogradação da farinha de trigo e formação do complexo amilose-lipídeo sem e com IMP.	50
Tabela 9a – Valores de índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e coeficiente de determinação do modelo lei da potência (R^2) para o G' , G'' e G^* das amostras com água de acordo com o farinógrafo.....	54
Tabela 9b – Valores de índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e coeficiente de determinação do modelo lei da potência (R^2) para o G' , G'' e G^* das amostras com água fixa.....	55
Tabela 10 – pH das massas antes e após fermentação e volume das massas de pão sem e com IMP.....	57
Tabela 11 – Volume específico dos pães sem e com IMP.....	58
Tabela 12 – Parâmetros de cor instrumental do miolo dos pães sem e com IMP.....	62
Tabela 13 – Parâmetros de cor instrumental da crosta dos pães sem e com IMP.....	63
Tabela 14 – Cinética de retrogradação da amilopectina durante estocagem de pães com e sem IMP.....	65
Tabela 15 – Teor de fibras solúvel e total nos pães com e sem IMP.....	70
Tabela 16 – Parâmetros farinográficos da farinha de trigo controle e adicionada de AR.....	71
Tabela 17 – Parâmetros extensográficos da farinha de trigo controle e adicionada de AR...73	
Tabela 18 – Parâmetros alveográficos da farinha de trigo controle e adicionada de AR.....	74
Tabela 19 – Perfil viscoamilográfico obtido em RVA das amostras de farinha com AR.....	75
Tabela 20 – Propriedades térmicas de gelatinização e formação do complexo amilose-lipídeo da farinha de trigo, AR e misturas farinha-AR.....	76

Tabela 21 – Propriedades térmicas de retrogradação da farinha de trigo e formação do complexo amilose-lipídeo sem e com AR.....	77
Tabela 22a – Valores de índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e coeficiente de determinação do modelo lei da potência (R^2) para o G' , G'' e G^* das amostras com água de acordo com o farinógrafo.....	81
Tabela 22b – Valores de índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e coeficiente de determinação do modelo lei da potência (R^2) para G' , G'' e G^* das amostras com água fixa.....	82
Tabela 23 – pH das massas antes e após fermentação e volume das massas de pão sem e com AR.....	84
Tabela 24 – Volume específico dos pães sem e com AR.....	85
Tabela 25 – Parâmetros de cor instrumental do miolo dos pães sem e com AR.....	89
Tabela 26 – Parâmetros de cor instrumental da crosta dos pães sem e com AR.....	90
Tabela 27 – Cinética de retrogradação da amilopectina durante estocagem de pães com e sem AR.....	92
Tabela 28 – Teor de amido resistente na amostra de AR e nos pães sem e com AR.....	96

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais os consumidores estão preocupados com sua saúde, optando pelos alimentos orgânicos, naturais e funcionais. O uso de fibras alimentares em produtos alimentícios tem atraído grande interesse devido a seus benefícios à saúde. Em pães, vários tipos de fibras podem ser acrescentados na forma de farinhas integrais, sementes e fibras isoladas de frutas e vegetais para aumentar o valor nutritivo e funcional do alimento.

Com o aumento da demanda por pães funcionais, há grande interesse da indústria de panificação em novas fibras alimentares que tragam além dos benefícios à saúde, efeitos desejáveis ao processamento e à qualidade de pães, como maciez, textura e menor taxa de envelhecimento.

O envelhecimento de pães é um fenômeno complexo e ainda não entendido completamente. Ele inicia logo após o forneamento, com alterações que incluem aumento da umidade da crosta (perda da crocância), cristalinidade do amido, firmeza do miolo, perda das propriedades sensoriais e da capacidade de hidratação do miolo.

A substituição parcial da farinha de trigo por outros ingredientes provoca mudanças no comportamento reológico da massa alterando as características da mesma, o tempo de fermentação e a qualidade final do produto. No entanto, o percentual de substituição está diretamente relacionado com as mudanças que podem ocorrer, como a diluição da proteína formadora de glúten presente na farinha de trigo e interação com os demais componentes do meio. Desta forma, conhecer o comportamento de mistura da massa, tempo e temperatura da fermentação, processo de fabricação e qualidade da farinha de trigo podem minimizar parte deste efeito (CAUVAIN e YOUNG, 2009).

Fibra alimentar é a parte dos alimentos (vegetais) resistente à ação das enzimas digestivas de humanos, representadas pelos polissacarídeos não amiláceos, oligossacarídeos, carboidratos análogos (amidos resistente e dextrinas resistentes), lignina e quitosana (DeVRIES, 2003). São classificadas como fibras solúveis, facilmente fermentáveis no cólon, ou como fibras insolúveis, que tem ação no aumento do bolo fecal, mas com limitada fermentação no cólon (HOWLETT et al., 2010).

Estudos mostram que a inulina, uma fibra alimentar solúvel que possui propriedades bifidogênicas, imunológicas e bioquímicas que promovem a saúde, pode ser utilizada em pães sem alterar sua qualidade, uma vez que esta fibra exibe propriedades viscoelásticas que podem influenciar as propriedades reológicas da massa de várias formas: afetando a consistência, interagindo com o glúten e formando redes elásticas, contribuindo para a

elasticidade e força da farinha (PERESSINI e SENSIDONI, 2009; MORRIS e MORRIS, 2012).

Já a incorporação de amido resistente em pães pode proporcionar massas mais facilmente manuseáveis, pães com melhor volume, firmeza e textura mais suave e lisa que a de pães adicionados de fibras convencionais, além de exigirem menos ajustes na formulação (PEREIRA, 2007).

Porém, os estudos ainda se mostram inconclusivos com relação ao mecanismo de ação dessas fibras em panificação, tornando-se um desafio tecnológico.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da substituição parcial da farinha de trigo por fibras alimentares (inulina de média polimerização (IMP) e amido resistente (AR)) na farinha, reologia da massa, na qualidade e taxa de envelhecimento de pães.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o impacto da inulina de média polimerização e amido resistente na reologia e nas propriedades térmicas de gelatinização e retrogradação da farinha de trigo.
- Estudar a influência da inulina de média polimerização e amido resistente nas propriedades reológicas e microscópicas das massas.
- Determinar os parâmetros tecnológicos dos pães com e sem inulina de média polimerização e amido resistente e quantificar fibras no pão.
- Estudar a taxa de envelhecimento de pães com e sem inulina de média polimerização e amido resistente armazenados durante 10 dias.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PÃES

O pão é o alimento mais antigo e consumido no mundo, sendo que os processos de produção e tipos de pães produzidos variam com as diferentes regiões do planeta. Tradicionalmente o pão é obtido da mistura de farinha de trigo e água, adicionados de

fermento biológico e sal, além de outros ingredientes específicos se necessário. Por meio da aplicação de energia mecânica e incorporação de bolhas de ar durante a mistura ocorre a formação e o desenvolvimento do glúten, o qual é responsável por reter os gases produzidos durante a fermentação e, juntamente com o amido, dar forma ao pão durante o forneamento (CAUVAIN e YOUNG, 2009).

O mercado de pães industrializados no Brasil registrou um aumento de 16% no faturamento em 2013 em relação a 2012, atingindo R\$ 4,09 bilhões. Nesse mercado, os pães industrializados representam 71% quando comparado a outros produtos panificáveis industrializados (ABIMA, 2014). Esse crescimento demanda desenvolvimento de novos equipamentos, formulações, aditivos e ingredientes alimentícios, especialmente aqueles com propriedades funcionais (ESTELLER e LANNES, 2005).

3.1.1 Farinha de trigo

Farinha de trigo é o produto obtido a partir de trigo das espécies *Triticum*, exceto *Triticum durum*, por meio do processo de moagem seca dos grãos. A classificação comercial da farinha de trigo é baseada principalmente na quantidade e qualidade das proteínas do glúten, as quais definirão sua aplicação (PIZZINATO, 1997). A farinha de trigo que apresenta um teor proteico alto e uma boa qualidade de glúten é a mais adequada para a panificação, enquanto que a farinha de trigo que apresenta um menor teor proteico e glúten mais fraco é mais indicada para bolos, pastéis e biscoitos (ELIASSON, 1993).

A farinha de trigo é composta principalmente por amido (65 a 75%), água (12 a 14%), proteínas (8 a 16%) e outros constituintes menores, como polissacarídeos não amiláceos (2 a 3%), lipídeos (2%) e cinzas (1%) (SCHEUER et al., 2011).

3.1.1.1 Amido

O amido é o principal carboidrato na farinha de trigo, responsável por aproximadamente 65% da sua composição. Apresenta-se na forma de grânulos, os quais são constituídos de dois componentes principais, a amilose e a amilopectina. A amilose é um polímero essencialmente linear formado por 500 – 6000 unidades de glicose ligadas em α -1,4, com poucas ramificações em ligações α -1,6, enquanto a amilopectina é altamente ramificada, com grau de polimerização de 3×10^5 a 3×10^6 unidades de glicose também unidas por ligações

α -1,4 com ramificações em α -1,6 (GOESAERT et al., 2005). Em seu estado nativo o amido é insolúvel em água fria, apresentando grânulos parcialmente cristalinos e cuja morfologia, composição química e estrutura molecular são características de cada espécie em particular (COSTA et al., 2008). Em algumas farinhas, principalmente aquelas adequadas à panificação, é desejável que até 10% dos grânulos de amido estejam “danificados”, isto é, tenham sido danificados durante a moagem e apresentem fendas e fissuras. Esses grânulos absorvem cerca de quatro vezes mais água do que os grânulos intactos, aumentando a absorção de água da farinha, além de serem mais suscetíveis à ação da alfa amilase, o que modifica as características da massa durante a fermentação no processo de panificação (GOESAERT et al., 2005).

Durante aquecimento do amido em excesso de água, a estrutura cristalina do amido é perdida e os grânulos absorvem água e incham de maneira irreversível até rompimento. A amilose é lixiviada dos grânulos. Os grânulos inchados, fragmentos de grânulos e amilose lixiviada constituem um sistema complexo no qual os grânulos estão dispersos em uma fase contínua de amilose-água (MESTRES, 1996). No resfriamento, ocorre o fenômeno da retrogradação do amido, que contribui para a estabilidade da estrutura final do pão (SHING et al., 2010). No pão recém-cozido e resfriado, as moléculas de amilose estão associadas e imobilizadas num firme gel retrogradado. Então as moléculas de amilopectina começam a se associar, pelo entrelaçamento de suas ramificações. Isto diminui a flexibilidade do gel e parece ser uma das principais causas do endurecimento do miolo à medida que o pão envelhece (MESTRES, 1996; GUTKOSKI, 2009). A Figura 1 mostra uma representação esquemática dos fenômenos de gelatinização e retrogradação do amido.

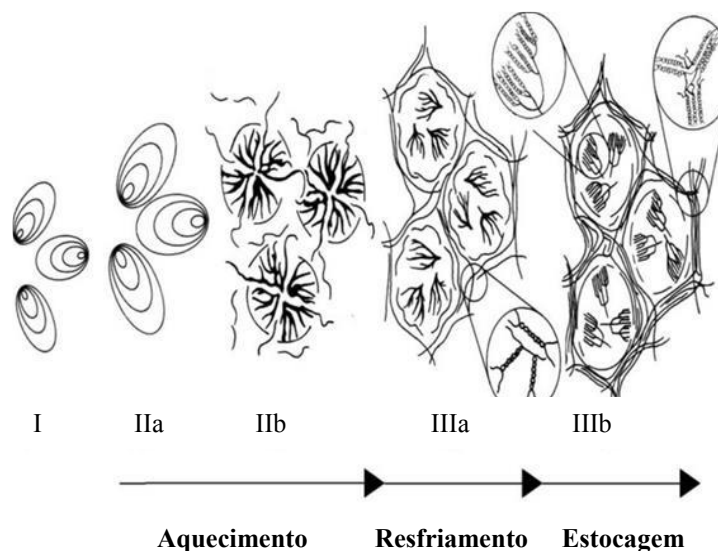


Figura 1 – Representação esquemática da gelatinização e da retrogradação do amido (I) Grânulos de amido nativo; (IIa) Inchamento dos grânulos; (IIb) amilose lixiviada e rompimento dos grânulos; (IIIa) Retrogradação da amilose; (IIIb) Retrogradação da amilopectina. (GOESAERT et al., 2005).

3.1.1.2 Amilases

As amilases catalisam a hidrólise do amido em dextrinas e açúcares fermentescíveis, os quais servem como substrato para as leveduras durante a fabricação do pão (OWENS, 2001). Em geral, a farinha de trigo contém quantidades adequadas de β -amilase, mas é deficiente em α -amilase. A suplementação da farinha com α -amilase melhora a qualidade da massa na panificação. A farinha contém apenas 0,5% dos açúcares fermentescíveis que seriam necessários para uma fermentação que produza uma massa leve e volumosa (CAUVAIN e YOUNG, 2009). A simples adição de sacarose ou outro açúcar (em excesso) levaria a uma fermentação muito rápida com alta produção de CO_2 , levando ao rompimento da rede de glúten e consequentemente a uma quebra da estrutura da massa. Portanto, a adição de α -amilase à farinha, aliada a uma pequena adição de sacarose à massa durante a produção do pão, seria o mais indicado, pois assim as leveduras consumiriam inicialmente a sacarose, enquanto uma contínua ação da enzima sobre o amido danificado liberaria gradualmente açúcares fermentescíveis, modulando assim a ação fermentativa da levedura. Isto resultaria em uma produção contínua e escalonada de CO_2 que seria incorporado pela malha de glúten, resultando em uma massa bem estruturada, leve e volumosa (MIRANDA e EL-DASH, 2002).

A α -amilase normalmente usada em panificação (α -amilase fúngica) é desnaturada a aproximadamente 50°C . Assim, quando a farinha gelatiniza ($\sim 70^\circ\text{C}$), a enzima já desnaturou,

não produzindo excesso de dextrinas. Excesso de dextrinas retém a umidade no pão deixando o pão com miolo pegajoso e mole (QUAGLIA e GENNARO, 2003).

3.1.1.3 Proteínas

As proteínas correspondem a aproximadamente 12% da composição da farinha, dividindo-se em proteínas solúveis (albumina e globulina), responsáveis por um sexto do total, e o restante referente às proteínas do glúten (gliadina e glutenina), que possuem as propriedades de panificação da farinha (STAUFFER, 1998). A gliadina é uma molécula de cadeia única, rica em prolina e glutamina, podendo associar-se entre si ou com gluteninas, o que proporciona extensibilidade e coesão à massa. A glutenina possui composição similar à da gliadina, porém é uma molécula de cadeia múltipla e é responsável pela resistência à extensão da massa, sendo essa uma propriedade característica do glúten de trigos próprios para a panificação (BORGHT et al., 2005).

Os teores de gliadinas e gluteninas são importantes para a qualidade do trigo e a relação de proporção entre essas proteínas determina as diferentes características do glúten dos diversos tipos de trigo (GUTKOSKI, 2009). O glúten (Figura 2) é constituído pelas frações hidratadas de gliadinas e gluteninas (BOBBIO e BOBBIO, 2001).

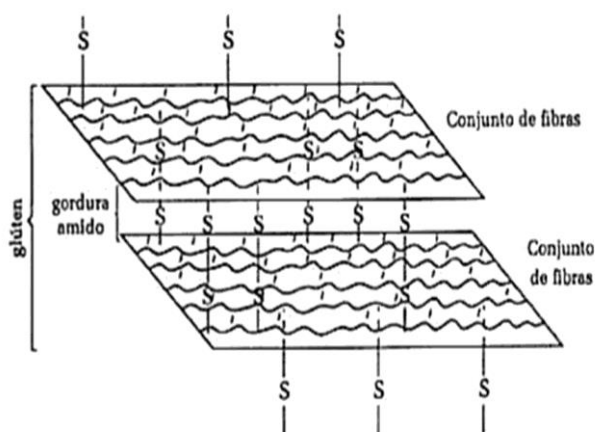


Figura 2 – Representação esquemática da estrutura do glúten (BOBBIO e BOBBIO, 2001).

No processo de panificação, quando a farinha é hidratada e submetida à energia mecânica, o glúten é transformado em uma rede contínua, coesa e viscoelástica (CAUVAIN e YOUNG, 2009). Durante a mistura, a resistência da massa cresce, atinge o ponto ideal e

decrece com o excesso de mistura (GOESAERT et al., 2005). Essa rede contínua é capaz de reter o gás carbônico responsável pelo crescimento da massa (OLIVEIRA et al., 2014).

3.1.1.4 Lipídeos

O teor de lipídeos presente na farinha depende não só das características genéticas e ambientais, mas também da moagem (CHUNG et al., 2009). Lipídeos podem ser divididos em lipídeos polares e não polares. A maioria dos lipídeos polares está presente no endosperma. Em geral os lipídeos polares formam 70-75 % do total dos lipídeos da farinha de trigo. Lipídeos internos de amido são predominantemente os lisofosfolipídeos. Já os lipídeos não polares são predominantemente presentes no germe e na semente de trigo (FINNIE, JEANNOTTE e FAUBION, 2009).

Os lipídeos têm a função de lubrificar o glúten, o que contribui para melhorar as propriedades de expansão da massa e, com isso, fornece pães com volumes maiores. Contribui para um miolo de textura mais suave e sedosa, além de retardar o envelhecimento do pão por formar complexo com o amido, diminuindo a sua taxa de retrogradação. Ainda auxilia na retenção dos gases da massa e produz uma crosta mais fina e macia (EL-DASH, CAMPOS e GERMANI, 1994).

3.1.1.5 Carboidratos não amiláceos

A farinha de trigo contém cerca de 2-3% de pentosanas, polissacarídeos compostos principalmente de D-xilose e L-arabinose. Estes polissacarídeos existem na forma solúvel e insolúvel. A forma solúvel melhora a qualidade do pão. As pentosanas insolúveis, entretanto, impedem o desenvolvimento do glúten que é de vital importância na formação da estrutura do pão e, conseqüentemente, reduzem o volume e prejudicam a textura do mesmo (EL-DASH, CAMARGO e DIAZ, 1990). A aplicação de pentosanases (xilanase/arabinosidases) à farinha leva à degradação das pentosanas, melhorando o manuseio da massa e dando um produto final com maior volume e melhor estrutura do miolo (ATWELL, 2001). A mistura de pentosanases e β -glucanases também melhora a qualidade do pão contendo fibras. Essas enzimas hidrolisam respectivamente, as pentosanas e β -glucanas de cereais, resultando com isso, em um melhor manuseio da massa e no tempo de desenvolvimento, um aumento no volume, além de redução no ressecamento e envelhecimento do pão (QUAGLIA e GENNARO, 2003).

3.2 ENVELHECIMENTO DO PÃO

O pão é considerado um produto popular consumido na forma de lanches ou com refeições, e apreciado devido à sua aparência, aroma, sabor, preço e disponibilidade (ESTELLER e LANNES, 2008). Depois de produzido, porém, sofre transformações que levam rapidamente à perda de crocância e ao endurecimento, fatores estes relacionados ao envelhecimento do pão.

O envelhecimento do pão se inicia logo após o forneamento, com uma série de mudanças que levam à redução gradual de sua qualidade. Essas mudanças incluem todos os processos que ocorrem durante a estocagem, exceto a contaminação microbiológica. O consumidor detecta o envelhecimento pelas mudanças na textura, no aroma e no sabor do produto (ELIASSON, 1993).

Essas transformações que acontecem durante o armazenamento do pão, embora venham sendo estudadas há mais de um século, não estão ainda completamente elucidadas e permanecem responsáveis por enormes prejuízos econômicos, tanto para a indústria de panificação quanto para o consumidor (GRAY e BEMILLER, 2003). As razões para isso podem estar relacionadas ao fato do envelhecimento do pão ser um processo complexo, sensível ao tipo de farinha, aditivos, condições de processamento e condições de armazenamento (ZOBEL e KULP 1996).

Numerosos estudos têm sido realizados e várias teorias propostas para elucidar esse fenômeno. Supõe-se que o mecanismo predominante do envelhecimento do pão seja a recristalização ou retrogradação do amido, que é um fenômeno em que as moléculas de amido gelatinizadas se reassociam formando uma estrutura cristalina de dupla hélice. A retrogradação da amilose ocorre durante as primeiras horas depois da cocção, enquanto a amilopectina se retrograda mais lentamente (Figura 3), sendo este o principal mecanismo envolvido no fenômeno de endurecimento do pão (ZOBEL e KULP 1996; RIBOTTA e LE BAIL, 2007). No entanto, apenas a retrogradação do amido é insuficiente para explicar as alterações que ocorrem nos produtos de panificação logo após a cocção e durante o armazenamento (MARTIN, ZELEZNAK e HOSENEY, 1991).

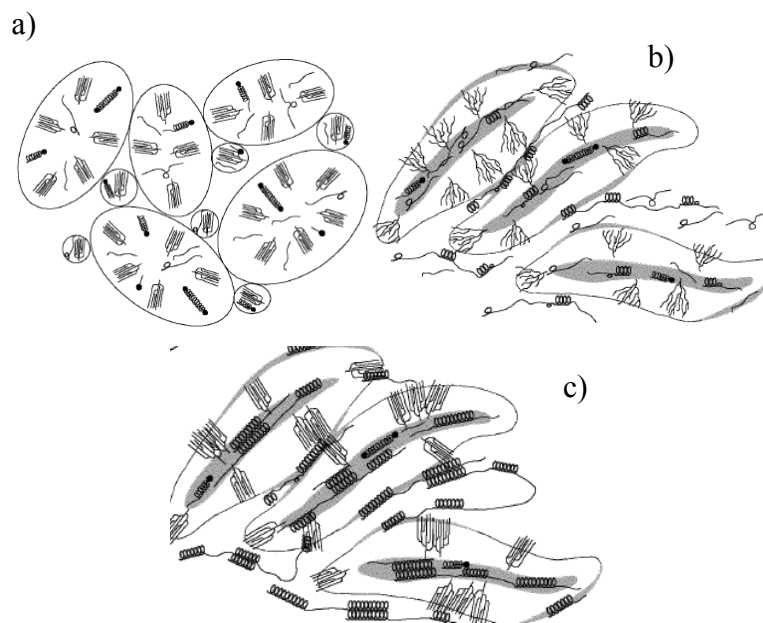


Figura 3 – Processo de retrogradação do amido. Amido intacto: a). Amido gelatinizado: b). Amido retrogradado: c) (HUG-LTEN, 2000).

Um modelo que explica a firmeza do pão pela interação amido-glúten foi proposto por Martin, Zeleznak e Hosney (1991). Nesse modelo, ligações cruzadas entre o amido (amilose e amilopectina) e o glúten conferem firmeza ao pão. Depois de gelatinizado as moléculas de amido parcialmente solúveis e inchadas podem fazer ligações com a proteína do glúten. Durante o envelhecimento do pão, o número e força dessas interações aumentam ao mesmo tempo em que ocorre a diminuição da capacidade de hidratação do miolo (desidratação), conferindo, portanto o envelhecimento ao pão.

De acordo com Ruan et al. (1996), o processo de firmeza do pão é acelerado pela migração de umidade durante o armazenamento. Esses autores estudaram a relação entre firmeza e mobilidade da água em produtos panificados durante a estocagem por 5 dias. Eles observaram que a percentagem de água livre no interior dos pães diminuiu com o decorrer do armazenamento, sendo esse efeito mais pronunciado nos primeiros dias. Nesse período, a cristalinidade do amido aumentou, não tendo água livre para plastificar a rede de glúten e amido. Consequentemente, o pão se tornou mais firme.

Curti et al. (2014) estudaram o efeito da adição de 5% e 15% de glúten sobre a taxa de envelhecimento dos pães. Esses pesquisadores observaram que os níveis mais elevados de glúten (15%) resultaram em massas com maior elasticidade e pães com maciez elevada. Os pesquisadores relatam que isso se deve a uma maior quantidade e disponibilidade de água do meio, plastificando a estrutura do miolo, resultando em maior maciez.

De acordo com Gray e BeMiller (2003), as alterações no amido (retrogradação da amilopectina) (ZOBEL e KULP, 1996), as interações amido-glúten (MARTIN, ZELEZNAK e HOSENEY, 1991) e a migração de umidade (RUAN et al., 1996) são, em conjunto, responsáveis pelo envelhecimento do pão.

3.3 FIBRA ALIMENTAR

Segundo a *American Association of Cereal Chemists* (AACC, 2001): “Fibra alimentar é a parte comestível de plantas ou carboidratos análogos que são resistentes à digestão e absorção no intestino delgado humano com completa ou parcial fermentação no intestino grosso. Fibra alimentar inclui polissacarídeos, oligossacarídeos, lignina e substâncias associadas de plantas. A fibra alimentar promove efeitos fisiológicos benéficos incluindo laxação e/ou atenuação do nível de colesterol no sangue e/ou atenuação nos níveis de glicose no sangue”.

De acordo com a solubilidade em água, as fibras alimentares podem ser classificadas em insolúveis (celulose, ligninas e algumas hemiceluloses) e solúveis (pectinas, gomas, etc.). Essa classificação está relacionada com as propriedades físico-químicas e efeitos nutricionais de cada uma (GIBSON e ROBERFROID, 1995).

Os alimentos contendo fibras alimentares insolúveis trazem benefícios como redução do tempo de retenção do bolo fecal no intestino grosso, reduzindo o tempo de contato do órgão com substâncias cancerígenas e, conseqüentemente, reduzindo o índice de câncer de colo retal (ROBERFROID et al., 2010), enquanto aqueles contendo fibras solúveis dificultam a absorção de açúcares e de gorduras no intestino, contribuindo com a redução dos níveis lipídicos sanguíneos e teciduais, assim como da glicemia. Ainda, uma característica fundamental da fibra solúvel é a sua capacidade para ser metabolizada por bactérias, conferindo efeito prebiótico (SLAVIN, 2013).

O enriquecimento de pães com ingredientes funcionais é de interesse para o consumidor, bem como para a indústria de cereais. Estudos têm investigado o efeito da adição de diferentes fontes de fibras no pão, tais como a inulina e os amidos resistentes (MEYER e PETERS, 2009; FUENTES-ZARAGOZA et al., 2011; ALMEIDA, CHANG e STEEL, 2013).

3.3.1 Inulina

A inulina, por ser uma fibra alimentar, também pode ser utilizada em alimentos para enriquecê-los ou torná-los “fonte de fibras”. Na lista de alimentos/ingredientes com alegações de propriedade funcional aprovada pela ANVISA, no grupo das Fibras Alimentares encontra-se a inulina com a seguinte alegação: “A inulina contribui para o equilíbrio da flora intestinal. Seu consumo deve estar associado a uma alimentação equilibrada e hábitos de vida saudáveis” (BRASIL, 2000).

A ingestão de inulina resulta em um significativo incremento dos benefícios das bifidobacterias, além de outros efeitos benéficos a saúde, como a modulação do metabolismo lipídico e a redução do risco de doenças como câncer de cólon e osteoporose (DELZENNE et al., 2002; ROBERFROID, 2007).

A inulina (Figura 4) é um carboidrato formado por polímeros de frutose unidos por ligações glicosídicas do tipo β -2,1, podendo ter ou não uma unidade de glicose na extremidade da cadeia. Pode apresentar diferentes graus de polimerização (GP), sendo a quantidade de GP que definirá sua nomenclatura (Figura 5), (GIBSON e ROBERFROID, 1995; MANSO et al., 2008). Fruto-oligossacarídeos de cadeia curta são conhecidos como oligofrutose (GP = 1-8), enquanto a cadeia média de fruto-oligossacarídeos é conhecida como inulina (GP = 10-13, em média e 63 no máximo) (MORRIS e MORRIS, 2012).

Os diferentes GP's da inulina afetam suas propriedades físicas, como viscosidade e capacidade de formação de gel, sendo, portanto, uma importante característica a ser estudada (ZIMERI e KOKINI, 2003, MORRIS e MORRIS, 2012).

A inulina pode influenciar as propriedades da massa de várias formas. Ela pode interagir com o glúten e contribuir para formação de redes elásticas, aumentando a elasticidade e a força da farinha e alterando a consistência da massa (PERESSINI e SENSIDONI, 2009; MORRIS e MORRIS, 2012). Além disso, a inulina tem uma elevada capacidade de retenção de água, evitando a secagem excessiva da massa e também inibindo a retrogradação do amido (NAKAKUKI, 1993). Existem inulinas comerciais com vários GP's, sendo a inulina de média polimerização (GP $\geq$ 10) a mais indicada para o processamento de pães (PERESSINI e SENSIDONI, 2009). Essa inulina é comercializada pela *Beneo-Orafti* como inulina GR.

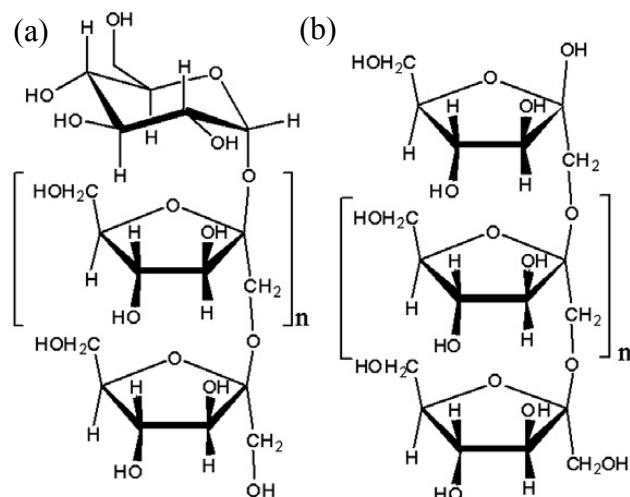


Figura 4 – Cadeias de fruto-oligossacarídeos com (a) e sem (b) glicose na extremidade. n = número de frutose. (adaptado de MORRIS e MORRIS, 2012).

Existem vários estudos sobre a incorporação de inulina em pães, mas ainda há muita contradição se esta fibra é capaz de, além de exercer seu papel funcional, ser também tecnologicamente viável. Meyer e Peters (2009) estudaram a qualidade de pães e o efeito de dois tipos de fermento (com alta e baixa invertase) sobre a retenção de inulina de diferentes GP's em pães adicionados ou não de carboximetilcelulose (CMC). Esses autores observaram que os pães com inulina de alta polimerização sem CMC apresentaram qualidade próxima àquela do controle, enquanto que para obter a mesma qualidade, os pães com inulina de baixa polimerização necessitaram da adição de CMC na formulação, além da utilização de fermento com baixa invertase. Os pesquisadores constataram que o uso de uma levedura com baixa atividade de invertase pode aumentar em até três vezes o nível de retenção de inulina nos pães, que a ação da invertase é mais pronunciada sobre a inulina de menor GP, e que a adição de CMC nas formulações dos pães contribuiu para diminuir a ação da enzima, promovendo uma maior retenção da inulina.

Peressini e Sensidoni (2009) estudaram o efeito da incorporação de inulina com diferentes GP's nas características reológicas e na qualidade de pães produzidos a partir de dois tipos farinha de trigo (fraca e forte). A substituição da farinha por 2,5 a 7,5% de inulina, independentemente do GP, reduziu a capacidade de absorção de água da farinha e aumentou o tempo de desenvolvimento e a estabilidade da massa. O módulo de armazenamento (G') aumentou gradualmente e a $\tan(\delta)$ diminuiu com o aumento dos níveis de inulina de médio e alto GP, contribuindo para o aumento da elasticidade e resistência da massa, o que limitou sua expansão na etapa de fermentação, reduzindo significativamente o volume dos pães e

aumentando a firmeza do miolo. No entanto, os pães obtidos de ambas as farinhas substituídas de inulina com grau médio de polimerização ($GP \geq 10$) apresentaram maior volume específico e menor firmeza quando comparados aos pães preparados com inulina de alta polimerização ($GP > 23$). Por outro lado, a inulina de baixo GP causou menores mudanças nas propriedades viscoelásticas das massas.

Hanger et al. (2011) pesquisaram a influência da inulina de baixa polimerização ($GP < 10$) e da β - glucana nas massas e pães com e sem glúten e observaram que a inulina de baixa polimerização tem uso limitado para produção de pães com glúten, uma vez que essa fibra diminuiu a absorção de água da farinha e aumentou a elasticidade da massa, a cor da crosta e a firmeza do miolo nos pães. Ainda assim, o volume específico e a taxa de envelhecimento dos pães com inulina não diferiram significativamente daqueles obtidos com o pão controle.

Há poucos estudos sobre a influência de fibras nas propriedades térmicas em pães. Rossell, Santos, e Collar (2008) investigaram o impacto das misturas de fibra dietética nas propriedades térmicas de massa de pão. Os autores substituíram a farinha em diferentes níveis (6-34 %) pela fibra solúvel (inulina), parcialmente solúvel (fibras de beterraba e ervilha) e insolúvel (casca da ervilha). Os perfis térmicos da massa de trigo foram investigados por meio da simulação de aquecimento, resfriamento e reaquecimento usando calorimetria exploratória diferencial (DSC). Em geral, a incorporação das fibras provocou atraso nas temperaturas de transição endotérmica, tanto para gelatinização como para a retrogradação, exceto para a temperatura de pico (T_p) na retrogradação. Os valores da entalpia de retrogradação da amilopectina foram inferiores ao longo de 10 dias de armazenamento quando comparados àqueles da massa livre de fibras.

Já Ronda et al. (2014), em suas pesquisas sobre o efeito de diferentes fibras sobre o tempo de fermentação da massa e sobre a recristalização do amido durante o envelhecimento do pão, observaram que a inulina foi a fibra responsável por promover uma maior recristalização da amilopectina, porém a inulina propiciou atraso na migração de água do miolo para crosta durante o envelhecimento, conferindo menor firmeza no miolo.

3.3.2 Amido Resistente (AR)

O amido resistente (AR) é definido como “a soma do amido e seus produtos de degradação que não são absorvidos no intestino delgado de indivíduos saudáveis” (ASP, 1992).

De acordo com a origem e características físicas o AR é classificado em: (i) AR1 é o amido inacessível fisicamente; (ii) AR2 refere-se aos grânulos de amido naturalmente resistentes às enzimas, (iii) AR3 é formado após a retrogradação do amido ou frações lineares deste polímero; (iv) AR4 é o amido modificado quimicamente. Mais recentemente classificou-se também o amido tipo (v) AR5 como sendo aquele em que a amilose está complexada com lipídeos (FUENTES-ZARAGOZA et al., 2011).

Por apresentar características fisiológicas similares às das fibras, o AR pode ser utilizado em substituição a elas com vantagens: não provoca grandes alterações nas características sensoriais dos produtos, pois possui coloração branca, sabor suave e pequeno tamanho de partícula, e pode ser usado com menores ajustes na formulação devido a sua menor capacidade de absorção de água quando comparado às fibras tradicionais (PEREIRA, 2007).

Os amidos resistentes comercialmente disponíveis têm sabor insípido, cor branca, apresentam elevadas temperaturas de gelatinização, são capazes de formar filmes de boa qualidade e têm propriedades de absorção de água inferiores às da fibra tradicional. Deste modo, as qualidades sensoriais de produtos com o AR são melhoradas, quando comparadas àquelas de produtos tradicionalmente ricos em fibras (SAJILATA et al., 2006). Alguns amidos comerciais, como o Hi-Maize[®] 260 da *Ingredion*, possuem teor de AR em torno de 54% (base seca) e são resistentes a altas temperaturas (INGREDION, 2014).

Fu et al. (2008) estudaram o efeito dos amidos resistentes tipo II e III sobre as propriedades farinográficas e de pasta de farinhas de trigo com baixo, médio e alto teor de glúten. AR2 e AR3 substituíram parcialmente as farinhas nas proporções de 0-20%. O tempo de desenvolvimento e o índice de tolerância à mistura diminuíram com o aumento na proporção de AR, enquanto que a absorção de água da farinha aumentou. Os autores observaram melhores resultados quando a farinha com alto teor de glúten foi usada, sugerindo que o AR enfraquece as ligações entre as proteínas. As viscosidades de pasta diminuíram com o aumento do teor de AR. Os autores relataram ainda que o AR, independente da classe utilizada, não interferiu na temperatura de pasta das farinhas, atuando como um ingrediente inerte, pois por possuir alta temperatura de gelatinização, seus grânulos não incharam e não gelatinizaram sob as condições usadas no experimento.

Almeida, Chang e Steel (2013) estudaram o efeito da combinação de diferentes fibras dietéticas (farelo de trigo, amido resistente e goma de semente de alfarroba) no processo e nos parâmetros de qualidade do pão de forma, e observaram que, das fibras adicionadas à massa,

o AR foi o responsável por aumentar o tempo de desenvolvimento da massa, mas foi a fonte de fibra mais "inerte" em relação às características de qualidade de pão. Para alguns parâmetros sensoriais como cor da crosta, sabor e aroma, o AR não apresentou um efeito significativo no pão.

Em seus estudos, Sanz-Penella et al. (2010) analisaram os efeitos da substituição da farinha de trigo por amido de ervilha modificado (com alto nível de AR) no processo de panificação. O efeito do AR sobre as características reológicas da massa e características de qualidade do pão foi avaliado. A substituição da farinha pelo AR em até 20% aumentou a absorção de água, o tempo de desenvolvimento, o ITM e diminuiu a estabilidade. Os resultados viscoamilográfico mostraram que o AR não afetou a temperatura de pasta, mas diminuiu as viscosidades de pasta. A variação de entalpia nas farinhas diminuiu com o aumento do teor de AR. A substituição da farinha pelo AR propiciou pães com maior umidade, menores volumes específicos, maior firmeza e maior número de Avrami (n). Porém, a constante de velocidade (k) que representa a taxa de retrogradação da amilopectina foi menor com o aumento do teor de AR.

Já Rossel e Santos (2010), estudaram o efeito de diferentes fibras (pectina, amido resistente e uma mistura das duas fibras) nas propriedades tecnológicas de pães pré-cozidos congelados durante 10 dias de estocagem. Os pães contendo fibras apresentaram menor volume específico e maior firmeza do miolo durante o armazenamento, sendo que o AR foi a fibra que mais afetou tais parâmetros.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

Farinha de trigo com características adequadas para panificação adquirida na distribuidora de alimentos Daher e Cia Ltda., foi utilizada neste trabalho. De acordo com o laudo técnico fornecido pela empresa, a farinha de trigo apresenta: P = 98 mm H₂O, L = 94 mm, W = 311 x 10⁻⁴ J; *falling number* = 319 s, cinzas = 0,61, umidade = 13,40% e glúten úmido = 30,21%. Inulina Beneo[®] GR (com GP ≥10) foi gentilmente cedida pela Clariant (Brasil) e o amido resistente (Hi-Maize 260[®]) pela Ingredion (Brasil). Os demais ingredientes utilizados na produção dos pães foram obtidos do comércio local. Todos os outros reagentes utilizados foram puros para análise.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Caracterização da farinha de trigo

4.2.1.1 Composição química da farinha de trigo

Para determinação de umidade, lipídeos, proteínas e cinzas foram seguidos os métodos 44-30, 30-10, 46-12, 08-12, respectivamente, descritos no “*Approved Methods of American Association of Cereal Chemists*” (AACC, 2000). Todas as análises foram realizadas em triplicata. O teor de carboidratos totais foi calculado por diferença.

4.2.1.2 Teor de Glúten e Cor da Farinha

A análise de teor de glúten foi realizada segundo o método 38-12 (AACC, 2000), usando equipamento Glutomatic (modelo 2100, *Perten Instruments*, EUA) que fornece valores de índice de glúten, glúten úmido e glúten seco.

A cor da farinha de trigo foi determinada em colorímetro (modelo Chromo Meter CR 400, *Minolta*, Japão), acoplado a processador DP-100, com iluminante D65 e ângulo de 10°. Foi utilizado sistema de avaliação CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), com parâmetros de cor: L*, a* e b*. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

4.2.2 Propriedades reológicas e térmicas da farinha de trigo sem e com fibras

Visando uma concentração mínima final no pão que pudesse justificar um produto fonte de fibras, foram escolhidas as concentrações de 5, 7,5 e 10% de IMP e 10, 15 e 20% de AR.

4.2.2.1 Propriedades farinográficas

As características farinográficas da farinha de trigo controle e substituídas parcialmente de 5, 7,5 e 10% de IMP e 10, 15 e 20% de AR foram determinadas, em triplicata, em farinógrafo (modelo 810101, *Brabender*, Alemanha) de acordo com o método 54-21 da AACC (2000). Os parâmetros obtidos a partir do farinógrafo foram: absorção de

água (%), tempo de chegada (min), tempo de desenvolvimento (min), estabilidade (min) e índice de tolerância à mistura (UF, unidades farinográficas).

4.2.2.2 Propriedades extensográficas

As características extensográficas da farinha de trigo controle e substituídas parcialmente de 5, 7,5 e 10% de IMP e 10, 15 e 20% de AR foram determinadas, em triplicata, de acordo com o método 54-10 (AACC, 2000) em extensógrafo (modelo 860000, *Brabender*, Alemanha). Os parâmetros avaliados nos extensogramas foram: resistência à extensão (R_{50} , UF, unidades extensográficas), extensibilidade (mm) e número proporcional (D).

4.2.2.3 Propriedades Alveográficas

As características alveográficas da farinha de trigo controle e substituídas parcialmente de 5, 7,5 e 10% de IMP e 10, 15 e 20% de AR foram determinadas, em duplicata, de acordo com o método 50-30A (AACC, 1999) em alveógrafo (modelo MA-95, *Chopin*, França). Os parâmetros avaliados nos alveogramas foram: tenacidade (P), extensibilidade (L), relação P/L e energia de deformação da massa ($W \cdot 10^{-4}J$).

4.2.2.4 Propriedades de pasta

O equipamento Rápido Viscoanalisador (modelo RVA-4, *Newport Scientific*, Austrália) foi utilizado de acordo com o método 76-21 (AACC, 2000) para determinação das propriedades de pasta da farinha de trigo controle e aquelas substituídas parcialmente de 5, 7,5 e 10% de IMP e 10, 15 e 20% de AR. O programa “*Termoclines for Windows*” foi utilizado para o processamento dos dados. Todas as determinações foram realizadas em triplicata. Os parâmetros avaliados foram: temperatura de pasta, viscosidade de pico, viscosidade de quebra, viscosidade final e *setback*.

4.2.2.5 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas da farinha de trigo controle e substituídas parcialmente de 5, 7,5 e 10% de IMP e 10, 15 e 20% de AR foram determinadas utilizando um Calorímetro Exploratório Diferencial (modelo Pyris 1, *Perkin Elmer*, EUA). Foi utilizado índio para calibração do equipamento. Amostras em base seca (3 mg) foram pesadas em recipientes de alumínio para as amostras controle e com IMP, e em recipientes de aço inox para as amostras com AR. Água deionizada ou mistura de água deionizada e fibras (9 μ L) foram adicionadas e os recipientes foram selados em aparelho acessório do equipamento, e mantidos por 12 h a temperatura ambiente antes de serem analisados. As amostras foram aquecidas a uma razão de 10 °C/min de 25 °C a 125 °C para a farinha controle e aquelas com IMP e a uma razão de 10 °C/min de 25 °C a 150 °C para as amostras com AR. Um recipiente vazio foi utilizado como referência. As temperaturas de transição (inicial, de pico e final) e a variação de entalpia foram determinadas utilizando o software Pyris 1 da *Perkin Elmer*, EUA. Os recipientes com as amostras gelatinizadas foram armazenados a 4 °C por 14 dias para estudo da influência da IMP e do AR sobre a retrogradação da amilopectina. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

4.2.3 Ensaios reológicos oscilatórios

Os ensaios reológicos das massas dos pães foram realizados em reômetro (modelo AR-2000 EX, *TA Instruments*, EUA) equipado com geometria de placas paralelas serrilhadas com 40 mm de diâmetro, e espaçamento (“gap”) fixo de 1 mm. Um sistema Peltier foi usado para controle da temperatura. As massas dos pães foram preparadas de acordo com o item 4.2.5, porém sem o uso do fermento. Uma amostra da massa com e sem fibra foi removida do farinógrafo e imediatamente colocada entre as placas do reômetro. A temperatura durante os ensaios reológicos foi mantida a 30 °C. A amostra foi deixada em descanso por 10 min, tempo suficiente para o relaxamento da massa.

Os espectros mecânicos foram obtidos na região de viscoelasticidade linear (LVR). Os dados obtidos foram módulo de armazenamento (G'), módulo de perda (G''), módulo complexo G^* e $\tan \delta$ (G''/G'). As determinações foram realizadas em duplicatas e os resultados foram analisados usando o software *Rheology Advantage Instrument Control AR*.

Testes oscilatórios também foram realizados com as massas controle e com fibras preparadas usando a quantidade de água e o tempo de desenvolvimento fixos (aqueles obtidos para a farinha controle).

A lei de potência foi aplicada a fim de descrever a dependência de G' , G'' e G^* em relação à frequência (ω). Os valores de índice de consistência (k), índice de comportamento de fluxo (n) e coeficiente de determinação do modelo da lei da potência (R^2) para G' , G'' e G^* foram calculados conforme as equações 1, 2 e 3.

$$G' = k' \omega^{n'} \quad (1)$$

$$G'' = k'' \omega^{n''} \quad (2)$$

$$G^* = k^* \omega^{n^*} \quad (3)$$

4.2.4 Microscopia confocal de varredura a laser das massas

As amostras controle, com 7,5% de IMP e com 15% de AR foram preparadas segundo Peighambardoust et al. (2006), onde a farinha e a mistura farinha-fibra foi preparada utilizando água e 2% (m/m) de NaCl. O desenvolvimento das massas foi realizado em farinógrafo usando a quantidade de água e o tempo de desenvolvimento obtidos dos testes farinográficos. Para a microscopia, o preparo das amostras seguiu o procedimento descrito por Van de Velde et al. (2003), com modificações. Pedacos de massas (± 1 g) foram imediatamente congeladas em nitrogênio líquido e levadas ao micrótomo (modelo SLEE MAIZ Cryostat, MEY, Alemanha) a -18 °C para cortes de 3-5 mm de espessura que foram colocadas em lâminas de vidro. Em seguida as lâminas foram mergulhadas em solução fixadora composta por 4% de paraformaldeído e 1% de glutaraldeído em tampão fosfato a 0,05M (pH = 6,8). As lâminas foram reservadas por 1 h a temperatura ambiente antes da coloração em solução composta de isotiocianato de fluoresceína (FITC) e eosina (0,1% m/v) em água deionizada. O FITC cora o amido (verde) e a eosina as proteínas (vermelho). Após coloração, as lâminas foram mantidas a temperatura ambiente por 1h antes de serem observadas em CSLM (modelo LSM 710, Carl Zeiss, Alemanha). Imagens em 3D com zoom (20x) foram obtidas.

4.2.5 Produção do pão

As fibras nas quantidades de 5, 7,5 e 10% (IMP/farinha de trigo, m/m) e 10, 15 e 20% (AR/farinha de trigo, m/m) foram usadas separadamente em substituição à farinha de trigo. Pães produzidos com 100% de farinha de trigo foram usados como controle. Para a produção dos pães utilizou-se a metodologia de El-Dash (1978), com modificações. A formulação do pão constou de: 100% de mistura farinha de trigo e fibras, 1,75% de sal, 3% de açúcar, 3% fermento seco e 3% óleo de milho e água cuja quantidade foi aquela determinada de acordo com a capacidade de absorção de água da farinha ou mistura farinha-fibra determinada nos testes farinográficos descritos no item 4.2.2.1. O farinógrafo Brabender foi usado para a mistura da massa e o extensógrafo para o boleamento e modelagem da massa, ambos ajustados conforme descrito nos métodos 54-21 e 54-10 da AACC (2000), respectivamente. As massas foram fermentadas em BOD à temperatura de 32 °C e 80% de UR e assadas em forno (Turbo 240, *Pasiani*, Brasil) a 150 °C por 15 min. Os pães foram resfriados por 2 h a temperatura ambiente, embalados em sacos plásticos de polietileno, selados e armazenados a temperatura ambiente por 0, 1, 3, 5, 7 e 10 dias para estudos de envelhecimento. Nos dias de análise, amostras dos pães foram liofilizadas para posterior análise térmica e cristalográfica, pois o conteúdo de água presente nas amostras pode influenciar os estudos de cristalinidade (PRIMO-MARTIN et al., 2007).

4.2.6 Avaliação tecnológica e envelhecimento do pão

Os pães com e sem fibras foram armazenados por 10 dias à temperatura ambiente em sacos plásticos de polietileno e selados a quente com seladora de pedal. No dia 0, foram realizadas as análises de volume e pH da massa, teor de fibras totais e de AR. Nos dias 0, 1, 3, 5, 7 e 10 foram realizadas as análises de umidade, atividade de água, cor do miolo e crosta, análise térmica do miolo, difração de raios-X e firmeza do miolo.

4.2.6.1 Volume e pH da massa

O aumento do volume das massas de pão sem e com fibras durante a fermentação foi determinado de acordo com o método 22-14 da AACC (2000), usando-se um cilindro graduado. A diferença entre o volume final e o volume inicial da massa foi calculada. As

análises foram realizadas em triplicata. O pH das massas foi determinado potenciometricamente. Aproximadamente 10 g de massa foi misturada em 100 mL de água destilada e o pH medido imediatamente.

4.2.6.2 Volume específico dos pães

O volume dos pães foi determinado por deslocamento de sementes após 2 h do término do forneamento de acordo com o método 10-05 da AACC (2000). O volume específico foi calculado como a relação volume/peso ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$). Foram utilizados 3 pães de cada formulação (com e sem fibras) e a análise foi realizada em triplicata para cada pão.

Os pães com e sem fibras foram armazenados por 0, 1, 3, 5, 7 e 10 dias à temperatura ambiente em sacos plásticos de polietileno e selados com seladora a quente de pedal.

4.2.6.3 Umidade do miolo e da crosta dos pães

A umidade do miolo e da crosta dos pães controle e com fibras foi determinada, em triplicata, de acordo com o método 44-40 da AACC (2000). As amostras foram preparadas seguindo o método 62-05 da AACC (2000). As amostras, retiradas de três pães, foram, primeiramente, fatiadas, pesadas e dispostas em uma bandeja para secagem à temperatura ambiente por aproximadamente 24 h. Em seguida as amostras foram pesadas novamente e a perda de umidade durante esse período foi calculada pela diferença de peso. Então, as fatias parcialmente secas foram finamente trituradas em um multiprocessador para determinação da umidade em estufa, a 105 °C até peso constante.

4.2.6.4 Atividade de água do miolo e da crosta dos pães

Atividade de água do miolo e da crosta dos pães controle e com fibras foi medida, em triplicata, usando-se o equipamento *HygroLab* (modelo C, *Rotronic*, Suíça), à temperatura constante ($25,0 \pm 0,3$ °C). A análise foi realizada nos dias 0, 1, 3, 5, 7 e 10.

4.2.6.5 Análise de cor do miolo e crosta dos pães

Os parâmetros L^* , a^* , b^* da cor instrumental dos pães controle e com fibras foram determinados usando um colorímetro (modelo Colorflex 45/0, *HunterLab*, EUA) com fonte de iluminação D65 e ângulo de visão de 10° , ajustado para refletância especular incluída. O software universal, versão 4.1 foi usado para processar os resultados. Fatias de 1,25 cm de espessura retiradas do centro do pão foram analisadas em seis repetições.

4.2.6.6 Propriedades térmicas do miolo dos pães

Amostras frescas e armazenadas, previamente liofilizadas, foram adicionadas de água (1:3), aquecidas de 25°C a 125°C a uma taxa constante de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ usando um calorímetro exploratório diferencial (modelo Pyris 1, *Perkin Elmer*, EUA). Os valores dos parâmetros do modelo de Avrami foram estimados com os dados da entalpia de retrogradação durante o armazenamento por meio da equação não linear (4):

$$\theta = \frac{\Delta H_\infty - \Delta H_t}{\Delta H_\infty - \Delta H_0} = e^{-kt^n} \quad (4)$$

onde θ é a fração que irá se recristalizar/retrogradar, ΔH_0 , ΔH_∞ , ΔH_t são as entalpias de retrogradação no tempo zero, ∞ e “t” tempo, respectivamente, k é uma constante de velocidade (geralmente se usa $1/k$ = constante de tempo para comparar a taxa de retrogradação da amilopectina), e n é o expoente de Avrami (ARMERO e COLLAR, 1998).

4.2.6.7 Padrão de difração de raios-X

Os padrões de difração de raios-X das amostras controle e com fibras foram determinados utilizando-se um difractômetro de bancada (modelo RINT 2000, *Rigaku*, Japão) com radiação de Cu, linha K, $L = 1,542 \text{ \AA}$. A velocidade de varredura foi de $0,1^\circ$ por min e as condições de uso foram de 40 Kv e 30 mA. Depois de liofilizadas as amostras dos miolos dos pães com e sem fibras foram finamente trituradas. A cristalinidade relativa foi quantitativamente estimada baseada na relação entre a área cristalina e área total seguindo o

método de Nara e Komiya (1983) utilizando o software *Origin* versão 7.5 (Microcal Inc., EUA).

4.2.6.8 Firmeza do miolo do pão

A firmeza do miolo dos pães foi determinada usando um texturômetro (modelo TA – XT2i, *Stable Micro Systems*, Reino Unido) de acordo com método 74-09 da AACC (2000). A força em (Newton) máxima requerida para comprimir uma fatia do miolo com 2,5 cm de espessura a 40% de sua altura original, usando uma sonda circular (probe 36) de 3,6 cm de diâmetro foi determinada e 25% da força total aplicada foi usada como o valor da firmeza do miolo. Após 2 horas de forneamento e nos dias 1, 3, 5, 7 e 10 dias de armazenamento, as amostras de miolo foram obtidas com o auxílio de uma lâmina, que permitiu a retirada de pedaços de 2,5 cm de altura com diâmetro de 3,6 cm. O programa *Exponent* foi utilizado para o processamento dos dados. Todas as determinações foram realizadas com seis repetições.

4.2.7 Teor de fibras totais nos pães

A determinação do teor de fibra alimentar solúvel e total foram realizadas de acordo com os métodos enzimático-gravimétrico 985.29 da AOAC (1997) e Prosky et al. (1988). As amostras secas, moídas e desengorduradas foram submetidas à hidrólise enzimática (α -amilase, 100 °C por 30 min; protease, 60 °C por 30 min; e amiloglucosidase 60 °C por 30 min). Após a hidrólise as amostras foram filtradas em cadinhos (com etanol 95% e acetona). O resíduo retido foi seco a 105 °C e posteriormente pesado para determinar o teor de fibra insolúvel a partir da subtração do teor de cinzas e proteínas presentes. O filtrado de cada amostra foi precipitado com etanol 98% a 60 °C por 24 h. O precipitado foi filtrado com etanol 78%, etanol 95% e acetona e o resíduo retido foi seco a 105 °C e posteriormente pesado para determinar o teor de fibra solúvel a partir da subtração do teor de cinzas e proteínas presentes. O teor de fibra total é a soma dos resultados final da fibra insolúvel mais a fibra solúvel.

4.2.8 Teor de AR no pão

O preparo das amostras e o teor de AR nos pães foi determinado pelo método direto segundo Goñi et al. (1996). Amostras de miolo de pão foram liofilizadas e maceradas até passar através de uma peneira de 1 mm e em seguida desengorduradas. Amostra de 100 mg foi incubada com uma solução contendo 20 mg de pepsina a 40 °C durante 60 min para remover a proteína. Uma solução de tris-maleato, contendo 40 mg de α -amilase pancreática foi adicionada e a mistura incubada a 37 °C durante 16 h para hidrolisar o amido digerível. O hidrolisado foi centrifugado e o resíduo solubilizado com KOH 4M e incubado com amiloglucosidase (80 μ L) a 60 °C durante 45 min para hidrolisar o AR. O teor de glicose foi medido usando um kit de glicose-oxidase-peroxidase. O teor de AR foi calculado pela fórmula: mg de glicose x 0.9. A análise foi realizada em duplicata.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC) foi adotado para os experimentos. Os dados foram avaliados através do programa *Statistica 7.0*, abrangendo a análise descritiva dos dados pela análise de variância (ANOVA) do teste F, comparação de médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), e correlação de Pearson. Os seguintes intervalos foram considerados para as correlações: Forte: ($r \geq 0,9$, $p > 0,05$); média ($0,6 \leq r < 0,9$, $p > 0,05$) e fraca ($r < 0,6$, $p > 0,05$).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA DE TRIGO

5.1.1 Composição química da farinha de trigo

As quantidades e as diferentes características dos constituintes do grão, de acordo com seu cultivar, influenciam a qualidade tecnológica da farinha de trigo e seu uso final (MORITA et al., 2002). A composição química da farinha de trigo usada neste trabalho está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química da farinha de trigo (13,30 g/100 g).

Componentes	g / 100 g
Proteínas	12,13 ± 0,01
Lipídeos	1,66 ± 0,02
Cinzas	0,68 ± 0,00
Carboidratos Totais*	85,53

Média em base seca de três replicatas seguida do desvio-padrão. *Determinado por diferença.

O conteúdo de água representa um índice comercial importante, pois influencia o rendimento, conservação e características tecnológicas (GUARIENTI, 1996). Segundo BRASIL (2005), o teor de umidade na farinha de trigo não deve ser superior a 15%. O teor de umidade encontrada na farinha de trigo utilizada neste estudo foi de 13,30%.

A presença das proteínas do glúten na farinha de trigo é o principal fator que a torna apropriada à elaboração de produtos panificáveis levedados, pois é a rede proteica do glúten a responsável pela retenção de dióxido de carbono produzido durante as etapas de fermentação, e de forneamento nas massas levedadas (GOESAERT et al., 2005). O teor proteico presente na farinha foi de 12,13%. De acordo com Guarienti (1996), para fabricação de pães o teor de proteína ideal situa-se na faixa de 10,5 a 13,0 %, em base seca. Portanto, o teor de proteína encontrado é ideal para produção de pães.

Os lipídeos possuem papel importante na elaboração de pães. Segundo Chung et al. (2009), cerca de 90% dos lipídeos livres presentes na farinha de trigo se ligam aos seus componentes durante o processamento, especialmente durante a gelatinização do amido, onde os lipídeos presentes no grânulo de amido interagem com a amilose (MORRISON, LAW e SNAPE, 1993). O teor de lipídeo presente na farinha neste estudo foi de 1,66%. Segundo Guarienti (1996) os lipídeos estão presentes na farinha de trigo na porcentagem de 1 a 2%.

O teor de cinzas da farinha de trigo está diretamente relacionado à taxa de extração da farinha de trigo durante a moagem, mas depende também do tipo de trigo (CUBBADA, 1988). A farinha de trigo apresentou um teor de cinzas de 0,68%.

5.1.2 Teor de glúten e cor da farinha de trigo

O glúten é constituído pelas proteínas de reserva do trigo que ao serem hidratadas formam uma rede viscoelástica que proporciona as características físicas e reológicas de plasticidade, viscosidade e elasticidade importantes para as massas (COSTA et al., 2008). A cor da farinha está relacionada com seu teor de cinzas e consequentemente seu grau de

extração (CAUVAIN e YOUNG, 2009). Os teores de glúten e cor instrumental da farinha de trigo estão apresentados na Tabela 2.

O teste de glúten fornece a medida quantitativa de suas proteínas que está relacionada com a qualidade da farinha de trigo (BORGHT et al., 2005). Segundo Carvalho Júnior (1999), farinhas destinadas à panificação devem ter teores de glúten úmido na faixa de 24 a 36% e glúten seco entre 7,5 e 14%. Os resultados encontrados neste estudo estão dentro das faixas mencionadas

Tabela 2: Teores de glúten e cor instrumental da farinha de trigo.

Parâmetros	Porcentagem
Glúten Úmido (%)	27,25 ± 0,01
Glúten Seco (%)	9,31 ± 0,00
Índice de glúten (%)	97 ± 0,01
L*	93,40 ± 0,30
a*	-0,32 ± 0,16
b*	9,60 ± 0,00

Média de três replicatas seguida do desvio-padrão.

A legislação brasileira (BRASIL, 2005) estabelece que a farinha de trigo deva apresentar cor branca, com tons leves de amarelo, marrom ou cinza, conforme o trigo de origem. Em geral, considera-se uma farinha branca aquela que possui valor de L* superior a 93, de a* próximo a zero (inferior a 0,5 ou negativo) e de b* inferior a oito (ORTOLAN, HECKTHEUER e MIRANDA, 2010). A farinha de trigo usada neste estudo apresentou coloração branca tendendo ao amarelo (Tabela 2).

5.2 EFEITO DA INULINA NA FARINHA, REOLOGIA DAS MASSAS, QUALIDADE E TAXA DE ENVELHECIMENTO DE PÃES.

5.2.1 Parâmetros reológicos e térmicos da farinha de trigo sem e com IMP.

5.2.1.1 Parâmetros farinográficos, extensográficos e alveográficos da farinha de trigo sem e com IMP.

Os parâmetros reológicos das massas, em geral, são influenciados basicamente pela dureza do grão, granulometria da farinha e hidratação da massa (CAUVAIN e YOUNG 2009). Essas propriedades são determinadas pela participação das proteínas, do amido e da

água, onde a parte proteica da farinha tem a habilidade para formar a rede viscoelástica contínua do glúten, desde que haja água suficiente para a hidratação, e energia mecânica para a mistura (GRAS, CARPENTER e ANDERSSEN, 2000).

Os parâmetros farinográficos, extensográficos e alveográficos da farinha de trigo com 0, 5, 7,5 e 10% de IMP, estão apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5, respectivamente.

A farinografia determina as propriedades de mistura de uma massa de farinha de trigo. No farinógrafo a absorção da água da farinha é determinada, tendo como base a consistência específica da massa (GUARIENTI, 1996). Essa análise é amplamente utilizada como forma de monitorar o desenvolvimento da rede proteica de glúten, durante o processo de mistura da massa (WALKER e HAZELTON, 1996).

Tabela 3: Parâmetros farinográficos da farinha de trigo controle e com IMP.

Parâmetros	Controle	5% IMP	7,5% IMP	10% IMP
Farinográficos				
Absorção de água (%)	58,0	51,5	53,0	55,0
Tempo de chegada (min)	1,4 ± 0,1 ^c	1,4 ± 0,1 ^c	6,0 ± 0,0 ^b	9,1 ± 0,3 ^a
Desenvolvimento (min)	10,3 ± 0,1 ^b	11,3 ± 0,4 ^b	17,5 ± 0,7 ^a	16,3 ± 0,1 ^a
Estabilidade (min)	17,2 ± 0,3 ^b	28,2 ± 2,1 ^a	28,0 ± 0,1 ^a	20,2 ± 1,5 ^b
ITM (UF*)	10,0 ± 0,1 ^b	13,5 ± 2,1 ^b	10,0 ± 0,1 ^b	19,0 ± 1,4 ^a

Média de três replicatas seguida de desvio padrão. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa pelo Teste Tukey ($p \leq 0,05$). *UF – Unidades Farinográficas. ITM: Índice de tolerância à mistura.

De acordo com Atwell (2001), uma farinha com boas características de panificação possui alta absorção de água (> 58%), altos tempos de desenvolvimento (5 min) e estabilidade (> 10 min). O ITM e o tempo de estabilidade indicam o quanto uma farinha ainda pode ser trabalhada depois do tempo de desenvolvimento. Alto tempo de estabilidade e baixo valor de ITM (< 30) representam uma farinha boa para panificação, o que demonstra que a farinha de trigo usada neste trabalho apresentou características panificáveis adequadas (Tabela 3).

A IMP reduziu a absorção de água da farinha em 11; 8,6 e 5,2%, respectivamente, quando 5, 7,5 e 10% de IMP foi utilizada. Esses resultados concordam com aqueles de Peressini e Sensidoni (2009) e Wang, Rosell e Berber (2002). A queda na absorção de água da farinha na presença de IMP pode ter sido causada pelo fato da fibra não ter sido previamente hidratada para a análise, atrasando a absorção de água da mesma. No entanto, quanto maior a concentração da fibra, maior a absorção de água da mistura. A IMP é uma fibra solúvel que necessita de maiores tempos e temperaturas (> 60°C) para a hidratação (BOHM et al., 2005; MEYES e PETER, 2012). A diluição da farinha com as fibras reduziu a quantidade de amido

danificado e proteínas da mistura farinha-fibra, contribuindo também para reduzir a absorção de água. O amido danificado absorve cerca de quatro vezes mais água do que os grânulos intactos e, assim, a redução desse amido diminui a absorção de água da farinha (GOESAERT et al., 2005).

O tempo de chegada é a medida da velocidade de absorção de água pela farinha, em especial das proteínas do glúten. A substituição de 5% da farinha por IMP não alterou o tempo de chegada, mas maiores concentrações de fibra aumentaram esse tempo influenciando o tempo de hidratação da farinha. A inulina compete com as proteínas do glúten pela água no início do processo de mistura, retardando a formação da rede viscoelástica (PERESSINI E SENSIDONI, 2009), o que causou aumento no tempo de desenvolvimento e na estabilidade da massa. No entanto, ITM só foi alterado quando 10% de IMP foi utilizado, reduzindo a tolerância da massa a maiores tempos de mistura.

As características extensográficas estão relacionadas à qualidade e quantidade das proteínas formadoras do glúten presentes na farinha de trigo (PUPPO, CALVELO e AÑÓN, 2005). Quando hidratada, a gliadina é viscosa e pode ser esticada formando um fio fino, conferindo extensibilidade à massa. Já a glutenina proporciona elasticidade e resistência à extensão da massa (ATWELL, 2001). Estes parâmetros, resistência à extensão e extensibilidade, são importantes para a expansão e retenção de gás das massas durante a fermentação (PIZZINATO, 1997). Segundo esse autor, uma farinha de trigo ideal para produção de pães deve apresentar a 135 min de descanso, valores de $R > 560$ UE, $E > 155$ mm, $D > 0,5$. Os resultados extensográficos encontrados para a farinha de trigo mostram que a mesma apresenta valores superiores a esses limites (Tabela 4).

Nos primeiros 45 min de repouso, a resistência da massa a extensão e a estabilidade aumentaram quando a farinha foi parcialmente substituída por IMP, independente da concentração (Tabela 4). Com o aumento no tempo de repouso, a elasticidade da massa continuou aumentando com o aumento da concentração de IMP, enquanto a estabilidade diminuiu. Esses resultados culminaram com o aumento no valor D quando IMP foi usada, independente da concentração e do tempo de repouso da massa.

Tabela 4: Parâmetros extensográficos da farinha de trigo controle e com IMP durante diferentes tempos de descanso.

Parâmetros extensográficos	Controle	5% IMP	7,5% IMP	10% IMP
<i>R₅₀ (UE*)</i>				
45 min	375 ± 0 ^{Bb}	585 ± 7 ^{Ba}	675 ± 35 ^a	625 ± 7 ^a
90 min	555 ± 14 ^{Ab}	955 ± 28 ^{Aa}	> 1000	> 1000
135 min	630 ± 14 ^{Ab}	960 ± 28 ^{Aa}	> 1000	> 1000
<i>E (mm)</i>				
45 min	135,5 ± 0,7 ^{Bc}	160,5 ± 6,4 ^{Aa}	146,8 ± 1,1 ^{Ab}	148,0 ± 1,8 ^{Ab}
90 min	156,5 ± 4,2 ^{Aa}	134,3 ± 3,5 ^{Bb}	132,3 ± 6,0 ^{BCb}	116,8 ± 5,3 ^{Bc}
135 min	149,5 ± 4,2 ^{Aa}	122,5 ± 3,5 ^{Cb}	118,3 ± 6,0 ^{Cb}	111,3 ± 5,3 ^{Bb}
<i>D (R₅₀/E)</i>				
45 min	2,1	3,7	4,6	4,2
90 min	3,6	7,1	7,5	8,6
135 min	4,2	7,8	8,5	9,3

Média de três replicatas seguida de desvio padrão. Letras diferentes em minúsculo na mesma linha e maiúsculo na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste Tukey ($p \leq 0,05$). *UE-Unidades extensográficas. R₅₀: Resistência à extensão; E: Extensibilidade; D: Número proporcional.

De acordo com Pizzinato (1997), valor D acima de 2,5 é representativo de farinhas fortes. No entanto, a farinha ideal para produção de pão deve apresentar um equilíbrio entre elasticidade e extensibilidade para suportar a pressão exercida pelo gás carbônico produzido durante a fermentação, e para que a massa sofra deformação adequada para a formação da estrutura do miolo do pão (OLIVEIRA et al., 2014). Assim, valores D muito altos como os encontrados nos tempos de repouso de 90 e 135 min quando IMP foi utilizada não favorecem altos tempos de fermentação.

Wang, Rosell e Barber (2002) observaram que a elasticidade da massa diminuiu quando inulina de chicória foi usada em pão, enquanto Karolini-Skaradzinska et al. (2007) observaram aumento na estabilidade e nenhuma alteração na estabilidade da massa quando inulina de alta polimerização foi usada substituindo parcialmente a farinha de trigo. Já Meyer e Peters (2009) reportaram parâmetros farinográficos e extensográficos semelhantes aos encontrados neste trabalho quando 5% de inulina de média polimerização foi usada para substituir a farinha de trigo. Esses autores relataram que pão com qualidade semelhante à do controle foi obtido apenas quando carboximetilcelulose foi adicionada para aumentar a absorção de água da farinha. Os resultados extensográficos mostraram aumento na elasticidade e valor D da massa quando IMP foi usada, levando alguns autores (MEYER e PETERS, 2009; PERESSINI e SENSIDONI, 2009) a sugerir um fortalecimento da massa.

A análise alveográfica (Tabela 5) simula o comportamento da massa durante o processo de fermentação avaliando a viscoelasticidade (força e extensibilidade) da farinha de trigo, o que possibilita determinar o tipo de produto final para o qual a farinha é mais adequada (MÓDENES, SILVA e TRIGUEROS, 2009).

Tabela 5: Parâmetros alveográficos da farinha de trigo controle e com IMP.

<i>Parâmetros</i>	Controle	5% IMP	7,5% IMP	10% IMP
P (mm H ₂ O)	93,60 ± 4,45 ^a	72,15 ± 0,92 ^b	60,00 ± 1,70 ^c	45,95 ± 2,33 ^d
L (mm)	77,50 ± 2,12 ^a	64,00 ± 5,66 ^b	32,50 ± 3,54 ^c	30,00 ± 2,83 ^d
W (x 10 ⁻⁴ J)	278,94 ± 15,48 ^a	189,75 ± 3,83 ^b	93,75 ± 2,90 ^c	53,30 ± 2,97 ^d
P/L	1,21	1,13	1,85	1,53

Média de duas replicatas seguida de desvio padrão. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). P: tenacidade L: extensibilidade; W: força.

A tenacidade (P) combinada com a extensibilidade da massa (L) evidencia a qualidade tecnológica do glúten, que depende, em grande parte, da força das ligações entre as moléculas de proteína (COSTA, 2008). Segundo Guarienti (1996), uma farinha de trigo forte deve apresentar valores de P/L entre 0,61 a 1,20 e W entre 201- 400 x 10⁻⁴ J. Os parâmetros alveográficos da farinha controle são consistentes com uma massa forte.

Com a substituição de parte da farinha por IMP, a tenacidade, extensibilidade e força da massa diminuíram significativamente com o aumento da concentração de fibras na mistura, apesar da relação P/L ter aumentado quando teores de fibras acima de 7,5% foram utilizados.

Peressini e Sensidoni (2009) e Rosell, Santos e Collar (2010) sugerem que as cadeias de inulina podem interagir entre si e com as proteínas do glúten formando redes elásticas, justificando a alteração na consistência da massa. No entanto, os resultados alveográficos mostraram que a incorporação de IMP diluiu a rede de glúten, reduzindo assim a força da massa.

5.2.1.2 Propriedades de pasta da farinha de trigo sem e com IMP

O RVA mede o comportamento do amido durante a gelatinização por meio do controle da resistência ao torque de uma mistura de farinha e água, durante o aquecimento e o resfriamento (SCHEUER et al., 2011). O perfil viscoamilográfico da farinha de trigo com 0, 5, 7,5 e 10% de IMP está apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros viscoamilográficos das amostras de farinha com e sem IMP.

Amostras	Temp. pasta (°C)	Viscosidades (RVU)			
		Pico	Quebra	Final	Setback
Controle	94,38 ± 0,11 ^a	214,84 ± 8,72 ^a	59,17 ± 2,12 ^a	274,83 ± 8,84 ^a	119,17 ± 2,24 ^a
5% IMP	94,05 ± 0,57 ^a	183,13 ± 6,78 ^b	51,09 ± 0,12 ^b	239,96 ± 7,95 ^b	107,92 ± 1,06 ^b
7,5% IMP	94,73 ± 0,60 ^a	164,63 ± 0,64 ^{bc}	43,00 ± 1,41 ^c	225,50 ± 2,94 ^{bc}	103,88 ± 0,88 ^b
10% IMP	95,25 ± 0,10 ^a	146,63 ± 4,07 ^c	33,54 ± 1,47 ^d	209,71 ± 1,71 ^c	96,63 ± 0,53 ^c

Média de três replicatas seguida de desvio padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste Tukey ($p \leq 0,0$).

O aquecimento do amido em água promove a quebra das ligações de hidrogênio entre as cadeias poliméricas resultando no enfraquecimento da estrutura e intumescimento do grânulo. À medida que o aquecimento continua, os grânulos inchados se rompem e amilose é lixiviada para fora, formando uma rede que envolve grânulos de amido inchados e amilopectina. Com o resfriamento as moléculas de amilose se rearranjam, formando um gel firme (THOMAS e ATWELL, 1999). Na farinha as proteínas podem interagir com os grânulos de amido, atrasando a gelatinização e reduzindo o intumescimento dos grânulos (ZAIBUL et al., 2007). A IMP alterou as propriedades de pasta da farinha. A temperatura de pasta não foi alterada, porém as viscosidades de pico, de quebra, final e *setback* diminuíram quanto maior a concentração de IMP. A inulina é altamente hidrofílica e compete com o amido pela água, reduzindo o inchamento do grânulo e consequentemente seu volume, o que reduz o atrito entre as moléculas explicando as reduções nas viscosidades de pasta da farinha.

A lixiviação da amilose é também limitada pela presença de oligossacarídeos ou quando as interações entre as moléculas deste polímero são perturbadas pela presença de cadeias menores de frutano (JUSZCZAK et al. 2012). Desse modo, o grau de polimerização da inulina utilizada neste estudo (< 23) pode ter contribuído para limitar a lixiviação da amilose, diminuindo o *setback*. A tendência à retrogradação do amido determinada pelo RVA está relacionada principalmente à amilose, sugerindo que a IMP pode contribuir para diminuir a firmeza inicial do pão.

5.2.1.3 Parâmetros térmicos da farinha de trigo sem e com IMP

Os parâmetros térmicos de gelatinização e retrogradação da farinha de trigo sem e com IMP estão apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7: Parâmetros térmicos de gelatinização da farinha de trigo e formação do complexo amilose-lipídeo sem e com IMP.

Gelatinização				
Farinha	T₀ (°C)	T_p (°C)	T_f (°C)	ΔH (J/g)
<i>Controle</i>	58,77 ± 0,17 ^a	64,28 ± 0,10 ^{ns}	69,44 ± 0,31 ^{ns}	8,15 ± 0,12 ^a
<i>5 % IMP</i>	58,21 ± 0,04 ^b	63,18 ± 0,35 ^{ns}	69,47 ± 0,25 ^{ns}	7,72 ± 0,21 ^b
<i>7,5 % IMP</i>	58,41 ± 0,23 ^{ab}	64,10 ± 0,10 ^{ns}	69,38 ± 0,25 ^{ns}	7,72 ± 0,09 ^b
<i>10 % IMP</i>	58,56 ± 0,14 ^{ab}	64,21 ± 0,34 ^{ns}	69,80 ± 0,16 ^{ns}	7,98 ± 0,17 ^{ab}

Complexo amilose-lipídeo				
Farinha	T₀ (°C)	T_p (°C)	T_f (°C)	ΔH_{cx} (J/g)
<i>Controle</i>	86,98 ± 1,55 ^{ns}	90,88 ± 1,41 ^{ns}	99,12 ± 1,70 ^{ns}	1,53 ± 0,03 ^b
<i>5 % IMP</i>	84,64 ± 0,80 ^{ns}	90,49 ± 1,16 ^{ns}	98,38 ± 0,79 ^{ns}	1,69 ± 0,01 ^a
<i>7,5 % IMP</i>	84,85 ± 0,41 ^{ns}	88,70 ± 0,35 ^{ns}	99,81 ± 0,38 ^{ns}	1,69 ± 0,03 ^a
<i>10 % IMP</i>	86,50 ± 2,89 ^{ns}	91,90 ± 1,58 ^{ns}	100,43 ± 2,03 ^{ns}	1,66 ± 0,04 ^a

Média de três replicatas seguida do desvio-padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). T₀, T_p, T_f = temperaturas inicial, de pico e final, respectivamente; ΔH = variação de entalpia. ns: não significativo.

A presença de IMP em qualquer concentração praticamente não alterou os parâmetros térmicos de gelatinização do amido presente na farinha (Tabela 7) com exceção da amostra com 5% de IMP que sofreu leve redução de sua temperatura inicial de gelatinização e variação de entalpia. Esses resultados corroboram com aqueles observados para as propriedades de pasta da farinha com IMP (Tabela 6). Apesar da fibra competir com o amido pela água, nas condições deste experimento, houve independente da concentração de fibras, água suficiente para promover a gelatinização do amido, indicando que não houve interação da IMP com o amido.

Os lipídeos presentes nos cereais podem formar complexos com a amilose, no momento em que o amido é aquecido. A amilose forma uma hélice e no eixo desta hélice – onde se encontram os radicais hidrofóbicos do polímero – se inclui a cadeia de graxa, formando ligações com estes radicais. Em realidade, muitas moléculas podem formar complexos com a amilose, desde que apresentem uma parte hidrofóbica (FRANCO, 2001). A faixa de temperatura de dissociação deste complexo na farinha esteve entre 86,98 a 99,12 °C. A IMP, independente da concentração, não alterou as temperaturas de dissociação e alterou levemente a entalpia do complexo amilose-lipídeo.

Tabela 8: Parâmetros térmicos de retrogradação da farinha de trigo e formação do complexo amilose-lipídeo sem e com IMP.

Amido					
Farinha	T₀ (°C)	T_p (°C)	T_f (°C)	ΔH_{ret} (J/g)	TR (%)
<i>Controle</i>	45,43 ± 0,99 ^a	55,04 ± 0,75 ^a	63,38 ± 1,90 ^a	0,73 ± 0,02 ^d	8,95
<i>5% IMP</i>	44,11 ± 0,89 ^{ab}	52,16 ± 0,94 ^b	58,44 ± 0,40 ^b	1,00 ± 0,00 ^c	12,90
<i>7,5% IMP</i>	43,43 ± 0,57 ^{ab}	51,32 ± 1,01 ^b	59,13 ± 0,34 ^b	1,17 ± 0,03 ^b	15,15
<i>10% IMP</i>	43,26 ± 0,56 ^b	51,39 ± 0,60 ^b	58,46 ± 1,15 ^b	1,26 ± 0,02 ^a	15,79
Complexo amilose-lipídeo					
Farinha	T₀ (°C)	T_p (°C)	T_f (°C)	ΔH_{ret} (J/g)	-
<i>Controle</i>	90,18 ± 0,67 ^a	97,08 ± 2,09 ^{ns}	100,50 ± 0,40 ^{ns}	1,35 ± 0,05 ^c	-
<i>5% IMP</i>	86,90 ± 0,18 ^b	92,95 ± 2,02 ^{ns}	100,73 ± 0,15 ^{ns}	1,75 ± 0,02 ^b	-
<i>7,5% IMP</i>	86,84 ± 0,48 ^b	93,01 ± 2,14 ^{ns}	100,67 ± 0,35 ^{ns}	1,86 ± 0,05 ^a	-
<i>10% IMP</i>	86,45 ± 0,61 ^b	94,64 ± 0,49 ^{ns}	100,81 ± 0,25 ^{ns}	1,93 ± 0,01 ^a	-

Média de três replicatas seguida do desvio-padrão. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa pelo Teste Tukey ($p \leq 0,05$). T₀, T_p, T_f = temperaturas inicial, de pico e final, respectivamente; ΔH = variação de entalpia. TR = Taxa de retrogradação ($\Delta H_{ret}/\Delta H_g \times 100$). ns: não significativo.

As temperaturas de transição e variação de entalpia de todas as amostras retrogradadas foram menores que aquelas das amostras gelatinizadas. Com o resfriamento, as moléculas de amilose e durante o armazenamento, principalmente as cadeias de amilopectina se reorganizam novamente através de pontes de hidrogênio, formando uma estrutura mais organizada, semelhante à estrutura predominante antes da gelatinização (ATWELL, 2001). Os cristais formados durante a retrogradação tem um nível de organização menor que aquele do amido nativo, dessa forma as temperaturas de transição e variação de entalpia são reduzidas.

Houve diferença significativa na ΔH_{ret} entre a farinha controle e aquelas com IMP. A presença de IMP causou um aumento no ΔH_{ret} tanto para o amido quanto para o complexo amilose-lipídeo (Tabela 8) com o aumento da concentração de fibra, propiciando maior taxa de retrogradação da amilopectina nas amostras com IMP.

5.2.2 Ensaios reológicos oscilatórios da massa sem e com IMP

O conhecimento do comportamento reológico de massas de pães é importante para entender suas propriedades mecânicas, as quais afetam diretamente o processo de cocção e a qualidade do produto final. A viscoelasticidade da massa está relacionada a vários fatores, tais como a natureza da farinha, ingredientes, temperatura, absorção de água, incorporação de ar e tipo e tempo de mistura (McCANN, 2003).

Testes preliminares, em duplicata, usando a massa controle e com 10% de IMP foram realizados em uma ampla faixa de deformação ($1 \times 10^{-5} \leq \gamma \leq 100$) e em diferentes valores de frequência (1 e 10 rad/s) para encontrar a região de viscoelasticidade linear das amostras. O valor de G' (módulo de armazenamento) versus deformação (γ) foi plotado (Figura 5).

Os valores de G' permaneceram praticamente constantes, em uma ampla faixa de deformação (de 1×10^{-5} até 1×10^{-3}) em ambas as frequências avaliadas, de forma que um valor seguro de 5×10^{-4} foi usado para garantir que todas as análises estariam no limite do comportamento viscoelástico linear.

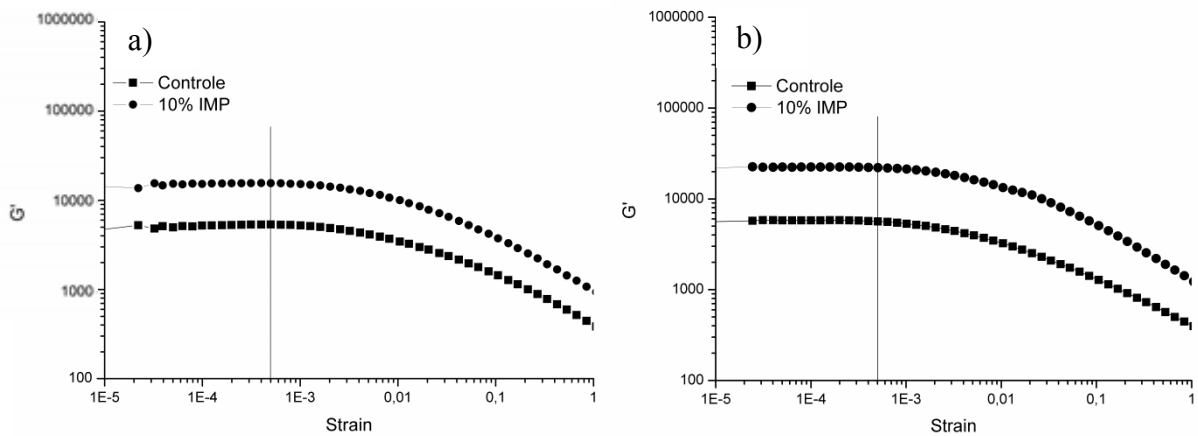


Figura 5: Região de viscoelasticidade linear das massas controle e com 10% IMP nas frequências de (a) 1 rad/s e (b) 10 rad/s.

De acordo com Albano, Franco e Telis (2014), em um teste oscilatório a amostra de alimento é submetida a uma pequena força oscilatória ou deformação (γ). O módulo de armazenamento, G' , expressa a magnitude da energia que é armazenada no material ou recuperada por ciclo de deformação. Portanto, para um sólido perfeitamente elástico, toda energia é armazenada, ou seja, G'' é igual a zero. Por outro lado, para um fluido com propriedades não elásticas (puramente viscoso), toda a energia é dissipada na forma de calor e, nesse caso, G' é zero. No entanto, para materiais viscoelásticos parte da energia é armazenada e parte da energia é dissipada.

Os espectros mecânicos (Figura 6a) mostraram que os módulos G' e G'' apresentaram apenas um leve aumento ao longo de uma ampla faixa de frequência, o que revela a existência de uma rede tridimensional e comportamento característico de sistemas estruturados em todas as amostras. Além disso, todas as amostras apresentaram G' maior que G'' indicando que as massas avaliadas apresentam caráter predominantemente elástico. A adição de 5% de IMP

causou diminuição de G' e G'' em relação à massa controle, enquanto que com a adição de 7,5% de IMP esses valores foram levemente maiores que aqueles da massa controle, aumentando ainda mais com 10% de IMP (Figura 6a). Comportamento semelhante foi observado quando o G^* foi avaliado (Figura 6b).

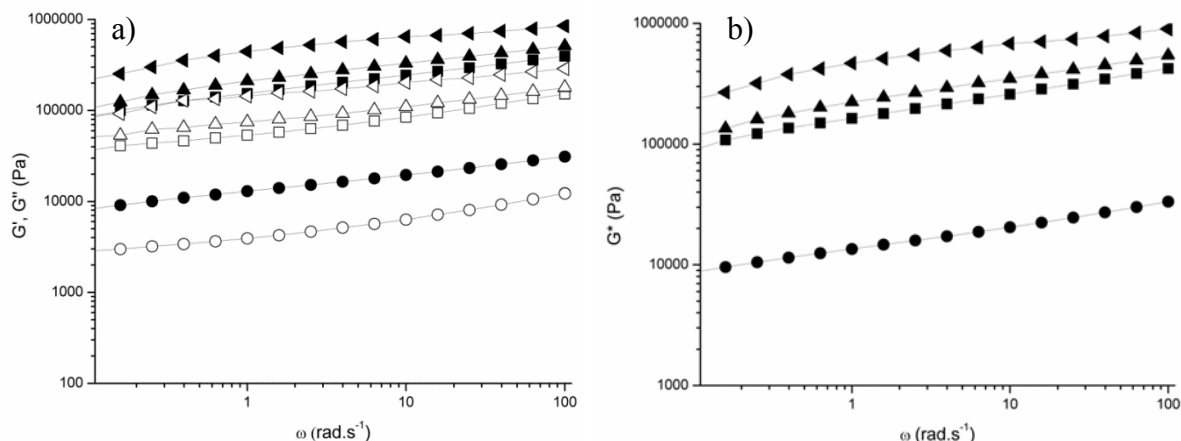


Figura 6: a) Módulos de armazenamento, G' (símbolos fechados), e módulo de dissipação, G'' (símbolos abertos), para as amostras de massas de pães nas concentrações de 0 (■, □); 5% (●, ○); 7,5 (▲, △) e 10% (◄, ◁) de IMP. b) módulo complexo, G^* (■); 5% (●); 7,5 (▲) e 10% (◄) de IMP. Quantidade de água e tempo de desenvolvimento ideal para cada amostra.

Estes resultados indicaram que as massas controle e com concentrações 7,5% de IMP apresentaram-se mais estruturadas e consistentes que aquela com 5% de IMP. No entanto, a massa com 10% de IMP se apresentou muito mais consistente que a massa controle. Esses resultados corroboram com aqueles encontrados nos testes extensográficos (Tabelas 4) que mostraram aumento na elasticidade da massa com o aumento na concentração de IMP. Peressini e Sensidoni (2009) sugeriram que interações inulina-inulina poderiam levar à formação de uma rede elástica e, assim, aumentar a elasticidade da massa causando aumento nos módulos viscoelásticos.

Por outro lado, quando a quantidade de água e o tempo de desenvolvimento usados no preparo da massa foram fixos (58% e 10, 3 min), G' , G'' e G^* indicaram que as massas estavam menos viscoelásticas que a massa controle em função da maior quantidade de água livre e falta de desenvolvimento do glúten nas massas com IMP (Figura 7), uma vez que a adição de IMP reduziu a absorção de água, como já foi demonstrado na Tabela 3.

Segundo Masi, Cavella e Sepe (1998), a água desempenha um papel importante na determinação das propriedades viscoelásticas da massa de pão. Ambos os módulos (G' e G'')

diminuíram quando a concentração de água aumentou. Isso porque a água possui um papel duplo: reduz as propriedades dinâmicas da massa e age como um lubrificante, aumentando o relaxamento entre as moléculas e assim conferindo menor resistência à deformação aplicada nos ensaios.

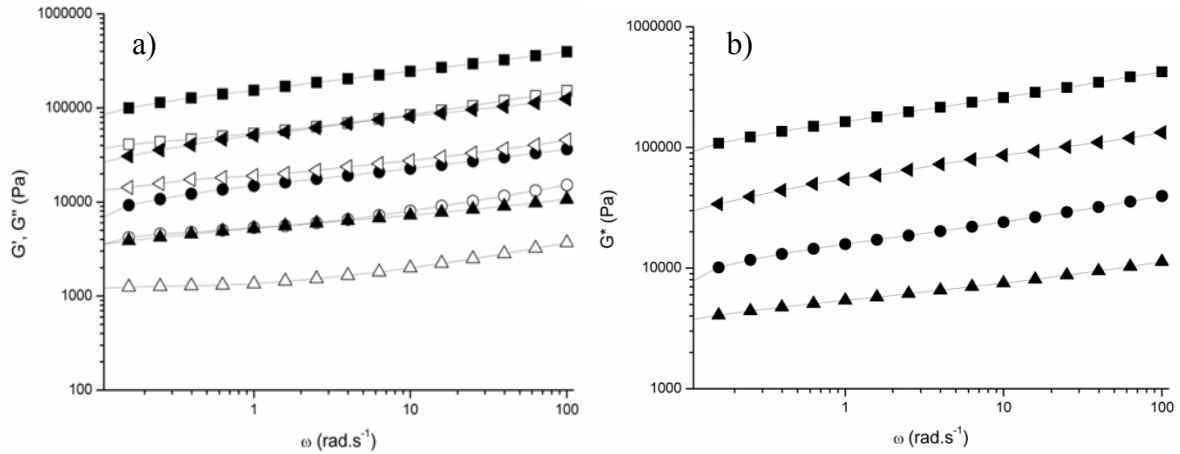


Figura 7: a) Módulos de armazenamento, G' (símbolos fechados), e módulo de dissipação, G'' (símbolos abertos), para as amostras de massas de pães nas concentrações de 0 (■, □); 5% (●, ○); 7,5 (▲, △) e 10% (◄, ◁) de IMP. b) módulo complexo, G^* (■); 5% (●); 7,5 (▲) e 10% (◄) de IMP. Quantidade de água e tempo de desenvolvimento fixos.

A $\tan \delta$ pode ser tomada como um indicador da organização da estrutura (interações moleculares) no material a ser analisado: materiais altamente estruturados apresentam valores baixos de $\tan \delta$. Em massas, $\tan \delta$ é independente do conteúdo de água (em certo intervalo), sendo este parâmetro reológico variável com o tempo de mistura (LETANG, PIAU e VERDIER, 1999; RENZETTI, BELLOA e ARENDA, 2008). A Figura 8 apresenta a $\tan \delta$ das massas preparadas nas diferentes condições de quantidade de água e tempo de desenvolvimento.

Os valores de $\tan \delta$ para todas as massas foram semelhantes durante todo o intervalo de frequência quando a quantidade de água e tempo de desenvolvimento ideais foram utilizados para cada amostra (Figura 8a).

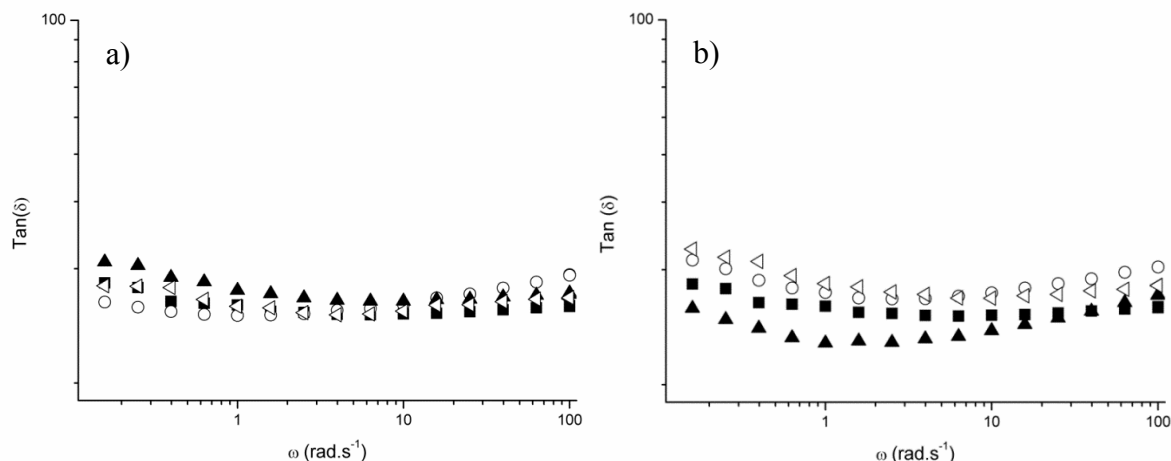


Figura 8: Tangente do ângulo de fase (δ) para géis nas concentrações de 0 (■); 5% (○); 7,5(▲) e 10% (◁) de IMP. a) Quantidade de água e tempo de desenvolvimento ideal para cada amostra; b) Quantidade de água e tempo de desenvolvimento fixos.

O modelo da Lei da Potência foi aplicado para estimar os parâmetros reológicos empíricos (k e n) correspondentes às equações (1), (2) e (3). O modelo ajustou-se muito bem aos dados ($R^2 > 0,952$). Os valores de índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e coeficiente de determinação do modelo da lei da potência (R^2) para G' , G'' e G^* das amostras com as quantidades de água e tempos de desenvolvimento ideais e fixos para cada amostra são mostrados nas Tabelas 9a e 9b, respectivamente.

Tabela 9a: Valores de índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e coeficiente de determinação do modelo da lei da potência (R^2) para G' , G'' e G^* das amostras com teor de água ideal de acordo com o farinógrafo.

Parâmetros	Controle	5% IMP	7,5% IMP	10% IMP
k' (Pa s ⁿ)	151.619,40 ± 20.325,85	12.763,55 ± 2.072,51	203.873,30 ± 13.081,16	422.183,70 ± 14.021,89
n' (-)	0,209 ± 0,009	0,190 ± 0,013	0,201 ± 0,011	0,158 ± 0,003
R^2	0,999	0,999	0,995	0,965
k'' (Pa s ⁿ)	53.158,04 ± 4.046,09	3.870,40 ± 865,05	73.855,70 ± 13.674,40	139.114,40 ± 10.385,05
n'' (-)	0,223 ± 0,018	0,242 ± 0,006	0,186 ± 0,018	0,158 ± 0,003
R^2	0,991	0,986	0,993	0,994
k^* (Pa s ⁿ)	160.775,60 ± 20.558,46	13.342,00 ± 2.234,41	217.018,40 ± 16.986,27	444.814,30 ± 16.398,98
n^* (-)	0,211 ± 0,011	0,195 ± 0,013	0,200 ± 0,012	0,158 ± 0,003
R^2	0,999	0,998	0,997	0,970

Média de duas replicatas seguida do desvio-padrão. ' valores referentes ao G' ; '' valores referentes ao G'' ; * valores referentes ao G^*

Tabela 9b: Valores de índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e coeficiente de determinação do modelo lei da potência (R^2) para o G' , G'' e G^* das amostras com teor de água fixo.

Parâmetros	Controle	5% IMP	7,5% IMP	10% IMP
k' (Pa s ^{n'})	151.619,40 ± 20.325,85	14.202,70 ± 5.103,31	5.141,70 ± 638,21	49.843,30 ± 4.332,37
n' (-)	0,209 ± 0,009	0,205 ± 0,001	0,155 ± 0,001	0,201 ± 0,007
R^2	0,999	0,994	0,998	0,994
k'' (Pa s ^{n''})	53.158,04 ± 4.046,09	5.156,09 ± 1.915,09	1.387,06 ± 222,94	18.816,50 ± 663,65
n'' (-)	0,223 ± 0,018	0,226 ± 0,003	0,200 ± 0,008	0,185 ± 0,006
R^2	0,991	0,980	0,952	0,990
k^* (Pa s ^{n*})	160.775,60 ± 20.558,46	15.127,90 ± 5.457,03	5.328,90 ± 672,54	53.314,30 ± 4.277,43
n^* (-)	0,211 ± 0,011	0,208 ± 0,001	0,159 ± 0,001	0,199 ± 0,006
R^2	0,999	0,996	0,997	0,997

Média de três replicatas seguida do desvio-padrão. ' valores referentes ao G' ; '' valores referentes ao G'' ; * valores referentes ao G^*

Como apresentado na Figura 6, os índices k (Tabela 9a) diminuíram quando 5% de IMP foi usado e aumentaram para as maiores concentrações da fibra em relação à massa controle, atingindo k^* de 444.814,30 Pa com 10 % de IMP. Esses resultados indicaram que a partir de 7,5% de IMP massas mais consistentes foram obtidas. Quando a quantidade de água e o tempo de desenvolvimento foram fixos no preparo das massas (Tabela 9b), os índices k diminuíram com o aumento da concentração de IMP. No entanto a massa com 10% de IMP mostrou valores (k' , k'' e k^*) maiores que as demais amostras com fibra.

O índice de comportamento (n) fornece informações úteis sobre a natureza viscoelástica do material. Para um material elástico ideal, o valor de n é igual a zero e se torna maior com o aumento da contribuição relativa do componente viscoso, n igual a 1 sugere que o material é puramente viscoso (OZKAN, XIN e CHEN, 2002). Além disso, em um sistema polimérico bastante estruturado através de ligações cruzadas (gel verdadeiro), as curvas de G' e G'' são paralelas ao longo de várias décadas de frequência, de modo que $G'(\omega) \propto G''(\omega) \propto \omega^n$, isto é, em um gel verdadeiramente elástico, os valores de n' e n'' devem ser iguais entre si e próximos de zero (ALBANO; FRANCO; TELIS, 2014). As Tabelas 9a e 9b mostram que as massas controle e com 10% de IMP são as que apresentam n' e n'' mais próximos entre si e isso ocorre, principalmente, nas massas onde o teor de água adicionado foi o ideal definido pelo farinógrafo.

Não houve grande variação nos valores n com o aumento do teor de IMP (Tabelas 9a e 9b), exceto para a concentração de 10%, em que a amostra apresentou os menores valores de

n. Estes resultados sugerem que nessa concentração de 10% de IMP a massa apresentou estrutura bem mais elástica.

5.2.3 Microscopia confocal de varredura a laser das massas com e sem IMP

A Figura 9 mostra a microestrutura das massas controle e com 7,5% de IMP observadas em microscópio confocal de varredura a laser.

Nas micrografias a fase proteica é vermelha, os grânulos de amido verdes e os buracos negros são bolhas de ar (PERESSINI e SENSIDONI, 2009), as quais estão mais visíveis na massa com 7,5% de IMP (Figura 9b) devido ao corte durante o preparo da amostra para análise. Ambas as imagens mostram a fase de glúten. No entanto, a massa controle (Figura 9a) mostra uma rede mais homogênea em toda a sua extensão, enquanto na massa com IMP (Figura 9b) a rede de glúten não está tão homogênea, apresentando algumas fases mais dispersas (proteína) em volta dos grânulos de amido, o que pode ter ocorrido devido à diluição da farinha e consequente enfraquecimento do glúten. Essa pequena diferença no grau de homogeneidade da rede de glúten observada entre as massas corrobora com as pequenas diferenças entre as propriedades viscoelásticas dessas massas (Figura 6 e 7).

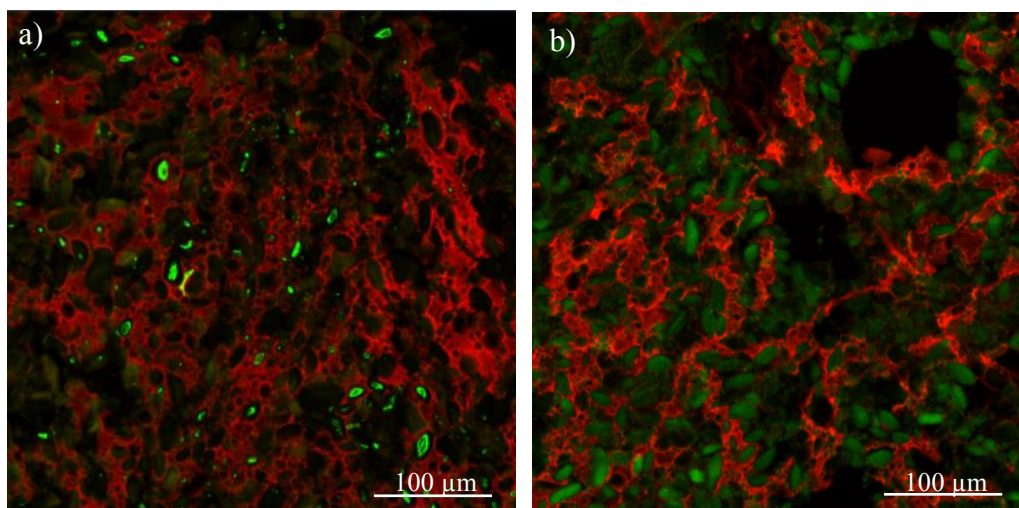


Figura 9: Micrografias das massas de pão obtidas em microscópio de varredura a laser confocal em 3D: a) massa controle; b) massa com 7,5% de IMP; verde: grânulos de amido; vermelho: proteínas.

5.2.4 Avaliação tecnológica e estudo de envelhecimento

5.2.4.1 Volume e pH das massas sem e com IMP

A fermentação das massas sem e com IMP ocorreu à temperatura de 32 °C por 90 min. A definição do tempo de fermentação utilizado neste estudo foi realizado seguindo o primeiro estágio de fermentação desenvolvido por Almeida (2011), que é correspondente ao estágio em que a massa apresenta ponto máximo de desenvolvimento do volume sem que a resistência ao toque seja perdida. O pH e o volume da massa controle e daquelas com IMP durante o período de fermentação, estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: pH das massas antes e após fermentação e volume das massas de pão sem e com IMP.

Massa	pH _{inicial}	pH _{final}	Volume (mL)
Controle	5,46 ± 0,01 ^b	5,27 ± 0,01 ^{ns}	366,67 ± 15,28 ^a
5 % IMP	5,57 ± 0,03 ^a	5,30 ± 0,03 ^{ns}	340,00 ± 0,50 ^{ab}
7,5 % IMP	5,56 ± 0,01 ^a	5,29 ± 0,01 ^{ns}	353,33 ± 11,54 ^a
10 % IMP	5,51 ± 0,02 ^b	5,25 ± 0,03 ^{ns}	323,33 ± 11,55 ^b

Média de três replicatas seguida do desvio-padrão. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa pelo Teste Tukey ($p \leq 0,05$). ns: diferença não significativa.

O pH das massas foi medido no início e após o término da fermentação. A massa fresca deve ter um pH inicial de aproximadamente 5,5 (CAUVAIN e YOUNG, 2009), o que foi observado para todas as massas estudadas, indicando que a inulina teve pouca interferência no pH inicial da massa.

Uma reação importante que ocorre e tem efeito sobre as características da massa é o aumento de acidez. A principal mudança do pH na massa durante o processo é causada pela produção de CO₂ durante a fermentação. As moléculas de CO₂ se associam às moléculas de água para formar ácido carbônico que por sua vez se dissocia parcialmente para formar íons H⁺ e HCO₃⁻ e assim diminuem o pH do meio. Essa redução no pH tem efeito marcante na hidratação e intumescimento do glúten e na velocidade de ação da enzima (EL-DASH, CAMARGO e DIAZ, 1990). No entanto, durante a fermentação, houve leve redução do pH que atingiu uma faixa de 5,3 em todas as massas estudadas, indicando que a incorporação das fibras em qualquer concentração estudada não interferiu na produção de ácidos durante a fermentação.

O uso de até 7,5% de IMP não alterou o volume da massa de pão, mas uma redução de 11,82 % ocorreu quando 10% de IMP foi utilizado. A redução no volume da massa contendo 10% de IMP correlacionou-se positivamente com a tenacidade ($r = 0,84$, $p > 0,05$), elasticidade ($r = 0,92$, $p > 0,05$) e força ($r = 0,75$, $p > 0,05$) (Tabela 5), que mostrou grande redução na força da farinha com a utilização de 10% de IMP. Esses resultados podem estar relacionados com a diluição da rede do glúten, que conferiu menor capacidade de retenção de gás da massa durante a fermentação.

5.2.4.2 Volume específico dos pães sem e com IMP

O volume específico do pão é um dos fatores mais importantes no que se refere à sua aceitabilidade. Sua importância está relacionada à qualidade do produto, uma vez que o volume do pão é afetado principalmente pela qualidade da farinha de trigo (EL-DASH, CAMARGO e DIAZ, 1990). Os volumes específicos dos pães controle e com IMP estão apresentados na Tabela 11, e a imagem dos pães pode ser observadas na Figura 10.

Houve redução significativa no volume específico do pão, independente da concentração de IMP, ao contrário do que ocorreu com o volume das massas durante a fermentação (Tabela 10), indicando que mesmo as massas com 5 e 7,5% de IMP que apresentaram volume similar à massa controle durante a fermentação, não suportaram a pressão dos gases durante o forneamento.

Tabela 11: Volume específico dos pães sem e com IMP.

Pão	Volume específico (cm ³ /g)
<i>Controle</i>	6,02 ± 0,16 ^a
<i>5 % IMP</i>	5,25 ± 0,27 ^b
<i>7,5 % IMP</i>	5,43 ± 0,25 ^b
<i>10 % IMP</i>	5,27 ± 0,05 ^b

Média de nove replicatas seguida do desvio-padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

Resultados semelhantes foram encontrados por Peressini e Sensidoni (2009) que observaram em seus estudos redução de 8,22% no volume específico dos pães com 7,5% de inulina de média polimerização. Wang, Rosell e Barber (2002) também observaram redução no volume específico dos pães de 3,5cm³/g para 2,9 cm³/g quando 3% de inulina foi utilizada.

Já Hager et al. (2011) não observaram diferença significativa no volume específico do pão, quando 6,8% de inulina foi incorporada à farinha.

No entanto, ao analisar as imagens dos pães na Figura 10, é possível observar que o pão com 7,5% de IMP foi o que apresentou características de granulose e uniformidade do miolo mais próximas às do pão controle.

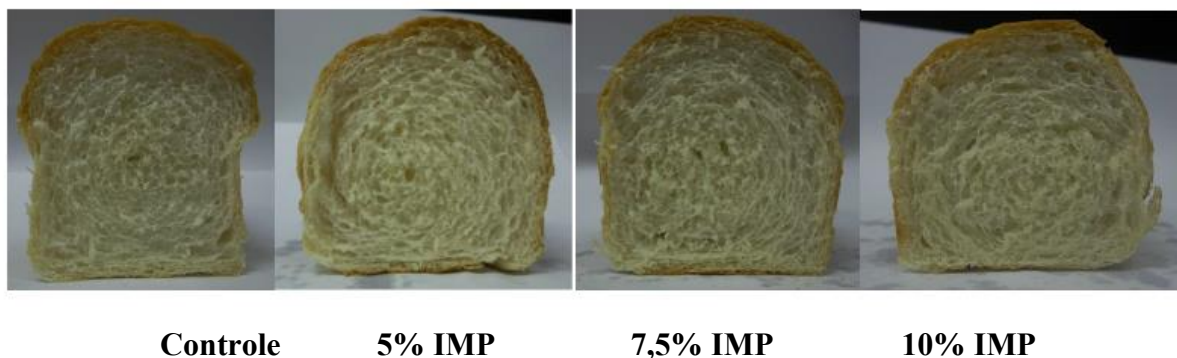


Figura 10: Características internas dos pães com e sem IMP.

Segundo Domínguez et al. (2003) a substituição da farinha de trigo por fibras acarreta inúmeras consequências ao desempenho da massa, reduzindo a força de glúten, diminuindo a probabilidade de crescimento da massa durante a fermentação e retenção do volume durante o forneamento. Isso porque a elasticidade e extensibilidade da massa são dependentes do conteúdo das proteínas formadoras do glúten (FOIS et al., 2011).

Trabalhos como os de Peressini e Sensidoni (2009) e Wang, Rossel e Barber (2002) propõem que a inulina fortalece a massa por causa de uma possível interação inulina-glúten e inulina-inulina. Porém, este estudo mostrou que isso possivelmente não acontece e a inulina enfraqueceu a massa, assim como muitas outras fibras.

5.2.4.3 Umidade e atividade de água dos pães sem e com IMP

O conteúdo de água no pão está diretamente relacionado à sua maciez. A redistribuição da água afeta o envelhecimento do pão. Em geral, quanto maior a quantidade de água no pão fresco, mais lento será o envelhecimento (CAUVAIN e YOUNG, 2009). Os teores de umidade do miolo e da crosta dos pães frescos e armazenados sem e com IMP estão apresentados na Figura 11.

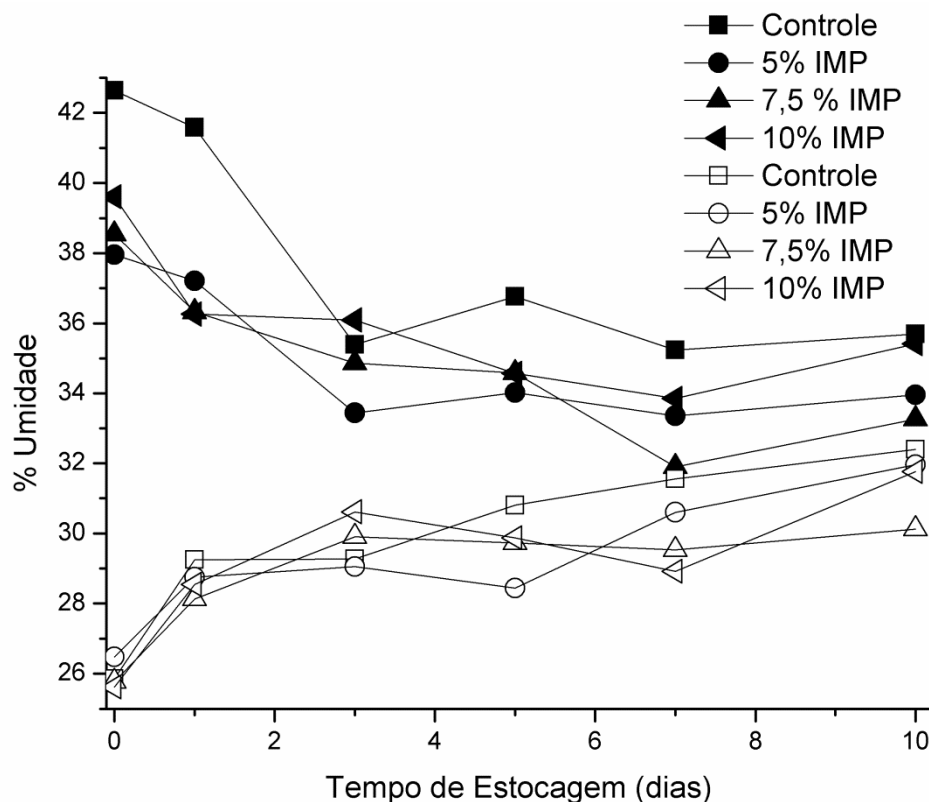


Figura 11: Teor de umidade do miolo (símbolos fechados) e da crosta (símbolos abertos) dos pães sem e com IMP durante armazenamento.

A umidade do miolo dos pães frescos sem e com IMP variou de 38 a 42,5%, limites aceitáveis para pães frescos (Shah, Shah e Madamwar, 2006). Esses valores correlacionaram positivamente ($r = 0,98$, $p > 0,05$) com a capacidade de absorção de água da farinha ou mistura de farinha-IMP, quantidades essas que foram utilizadas em cada uma das formulações. O teor de umidade das crostas dos pães frescos foi semelhante e próximo a 26%, com exceção do pão com 5% de IMP que foi levemente maior.

De acordo com Cauvain e Young (2009), durante o resfriamento do pão, um gradiente de umidade é formado. Diferenças nas pressões de vapor entre a crosta e a região interna resultam na migração de umidade do miolo para a casca. Com uma umidade inicial baixa, a crosta facilmente absorve água do miolo.

Resultados semelhantes foram encontrados por Wang, Rosell e Barber (2002) que observaram 33,4% de umidade para o miolo do pão controle e 31,8% para a amostra com 3% de inulina. Já Mandala, Polaki e Yanniotis (2009) não observaram diferença significativa entre as umidades das amostras com 3% de inulina, porém constataram que o pão com inulina

apresentou maior umidade na crosta, resultado parecido com o observado neste estudo para o pão adicionado de 5% de IMP.

A atividade de água (a_w) do miolo dos pães controle e com IMP está apresentada na Figura 12. A atividade de água no miolo dos pães frescos com IMP foi menor que aquela do pão controle, como ocorreu com o teor de umidade ($r = 0,99$, $p > 0,05$). Durante o armazenamento a queda na atividade de água no miolo do pão controle foi mais acentuada até o quinto dia, quando então as amostras tiveram valores semelhantes, independente da utilização de IMP. Os valores de atividade de água na crosta dos pães controle e com IMP foram semelhantes e crescentes durante todo o armazenamento. Após o 7º dia, a a_w da crosta das amostras controle e com 7,5% de IMP aumentou bruscamente, possivelmente pela absorção de água do ambiente, sugerindo que a estabilidade microbiológica desses pães pode ser comprometida após os 10 dias de armazenamento.

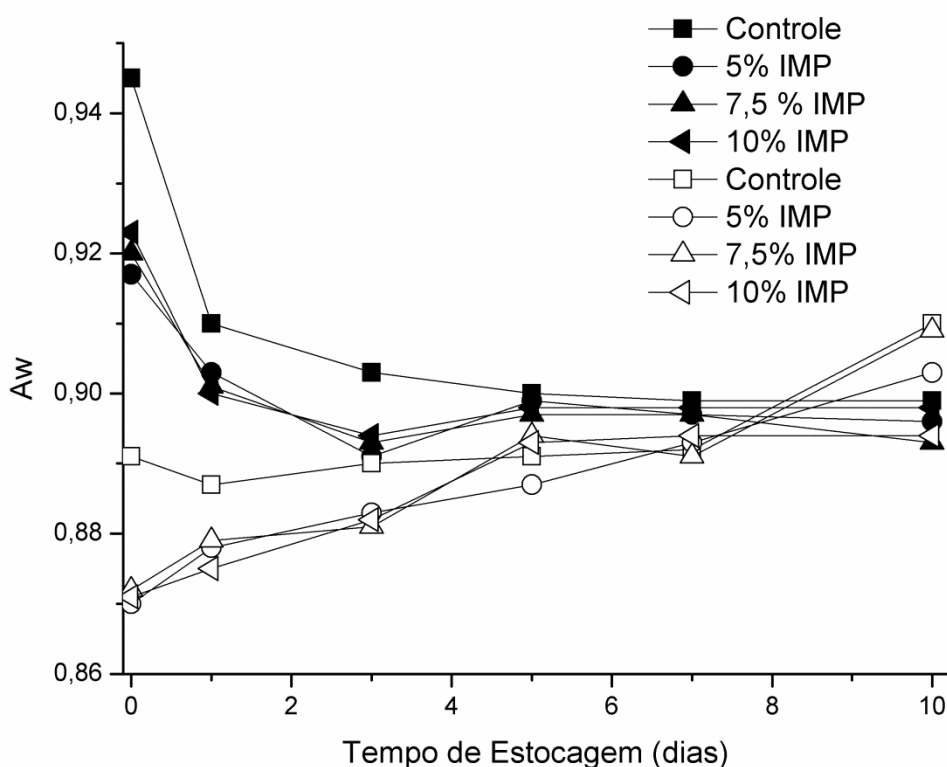


Figura 12: Atividade de água do miolo (símbolos fechados) e da crosta (símbolos abertos) dos pães sem e com IMP.

5.2.4.4 Cor do miolo e crosta do pão

Os parâmetros de cor observados para o miolo do pão controle e com IMP estão apresentados na Tabela 12.

A luminosidade do miolo praticamente não foi alterada pela substituição da farinha por IMP tanto no pão controle como durante o armazenamento, com exceção do pão fresco com 5% de IMP que mostrou-se levemente mais escuro que os demais.

Tabela 12: Parâmetros de cor instrumental do miolo dos pães sem e com IMP.

<i>Estocagem (dias)</i>	<i>Controle</i>	<i>5%IMP</i>	<i>7,5%IMP</i>	<i>10%IMP</i>
<i>L* miolo</i>				
0	76,16 ± 1,05 ^{NSa}	73,40 ± 0,74 ^{Db}	75,63 ± 0,19 ^{NSab}	75,75 ± 1,34 ^{NSab}
1	74,78 ± 1,93 ^{NSns}	76,55 ± 0,32 ^{Ans}	75,53 ± 0,21 ^{NSns}	74,92 ± 1,35 ^{NSns}
3	75,61 ± 1,16 ^{NSns}	76,45 ± 0,05 ^{Ans}	75,50 ± 0,50 ^{NSns}	75,57 ± 0,99 ^{NSns}
5	76,10 ± 0,15 ^{NSns}	75,36 ± 0,16 ^{BCns}	74,83 ± 0,32 ^{NSns}	75,11 ± 1,60 ^{NSns}
7	75,88 ± 0,21 ^{NSns}	74,95 ± 0,06 ^{Cns}	74,71 ± 0,54 ^{NSns}	74,90 ± 1,06 ^{NSns}
10	75,36 ± 0,55 ^{NSns}	75,99 ± 0,16 ^{ABns}	75,91 ± 0,69 ^{NSns}	75,18 ± 1,87 ^{NSns}
<i>a* miolo</i>				
0	0,91 ± 0,03 ^{Bb}	0,45 ± 0,05 ^{Dd}	0,82 ± 0,00 ^{Bc}	0,97 ± 0,00 ^{Ba}
1	0,27 ± 0,00 ^{Ed}	1,03 ± 0,04 ^{Bb}	0,89 ± 0,01 ^{Ac}	1,15 ± 0,01 ^{Aa}
3	0,56 ± 0,01 ^{Dc}	1,10 ± 0,01 ^{Aa}	0,92 ± 0,02 ^{Ab}	1,14 ± 0,02 ^{Aa}
5	0,73 ± 0,03 ^{Ca}	0,38 ± 0,01 ^{Ec}	0,48 ± 0,02 ^{Db}	0,77 ± 0,02 ^{Ca}
7	1,08 ± 0,03 ^{Aa}	0,43 ± 0,02 ^{DEc}	0,65 ± 0,01 ^{Cb}	1,00 ± 0,05 ^{Ba}
10	0,92 ± 0,02 ^{Bb}	0,74 ± 0,03 ^{Cd}	0,84 ± 0,01 ^{Bc}	1,16 ± 0,04 ^{Aa}
<i>b* miolo</i>				
0	18,79 ± 0,67 ^{ABCns}	18,30 ± 0,39 ^{ABns}	19,03 ± 0,75 ^{NSns}	19,05 ± 0,28 ^{ABns}
1	17,99 ± 0,58 ^{Ca}	19,10 ± 0,41 ^{Aa}	19,38 ± 0,65 ^{NSa}	19,45 ± 0,02 ^{Aba}
3	18,13 ± 0,60 ^{BCa}	18,87 ± 0,66 ^{ABa}	19,11 ± 0,28 ^{NSa}	19,06 ± 0,15 ^{Aba}
5	18,65 ± 0,19 ^{ABCab}	17,99 ± 0,20 ^{Bb}	18,73 ± 0,14 ^{NSa}	18,17 ± 0,45 ^{Bab}
7	19,55 ± 0,56 ^{Ans}	18,78 ± 0,31 ^{ABns}	19,84 ± 0,21 ^{NSns}	20,17 ± 1,00 ^{Ans}
10	19,51 ± 0,29 ^{ABa}	18,74 ± 0,07 ^{ABb}	19,41 ± 0,49 ^{NSa}	19,29 ± 0,78 ^{Aba}

Média de seis replicatas seguido do desvio padrão. Letras diferentes em minúsculo na mesma linha e maiúsculo na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: não significativo.

A cor da crosta é uma característica que interfere na aceitabilidade dos pães e está diretamente relacionada com a quantidade de açúcares, enzimas e também pelas condições de processamento como tempo de fermentação e tempo e temperatura de cozimento. A cor da crosta é resultado da reação não enzimática entre os açúcares redutores e os grupos amino

primários (reação de *Maillard*) durante o cozimento, e é induzida pela presença de íons de hidrogênio durante o processo de fermentação. A crosta deve ser dourada, brilhante e mais homogênea possível (EL-DASH, CAMARGO e DIAZ, 1990). Os parâmetros de cor observados para a crosta do pão controle e com IMP estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Parâmetros de cor instrumental da crosta dos pães sem e com IMP.

<i>Estocagem</i> <i>m (dias)</i>	<i>Controle</i>	<i>5%IMP</i>	<i>7,5%IMP</i>	<i>10%IMP</i>
<i>L* crosta</i>				
0	58,85 ± 2,19 ^{NSa}	52,54 ± 1,12 ^{NSb}	53,21 ± 1,00 ^{NSb}	49,56 ± 1,01 ^{NSb}
1	59,25 ± 1,43 ^{NSa}	52,24 ± 1,36 ^{NSbc}	53,28 ± 0,99 ^{NSb}	49,46 ± 1,06 ^{NSc}
3	59,35 ± 1,78 ^{NSa}	52,71 ± 1,17 ^{NSbc}	53,40 ± 0,94 ^{NSb}	49,36 ± 1,56 ^{NSc}
5	59,21 ± 0,77 ^{NSa}	52,98 ± 1,28 ^{NSb}	53,17 ± 0,91 ^{NSb}	50,13 ± 1,29 ^{NSc}
7	59,59 ± 0,37 ^{NSa}	52,53 ± 1,54 ^{NSb}	52,88 ± 0,99 ^{NSb}	49,35 ± 1,43 ^{NSc}
10	59,73 ± 0,92 ^{NSa}	52,50 ± 1,18 ^{NSbc}	53,09 ± 0,86 ^{NSb}	49,97 ± 1,36 ^{NSc}
<i>a* crosta</i>				
0	14,41 ± 0,24 ^{Ab}	17,03 ± 0,39 ^{NSa}	16,79 ± 0,36 ^{NSa}	16,19 ± 0,57 ^{NSa}
1	13,91 ± 0,61 ^{ABb}	16,78 ± 0,55 ^{NSa}	16,67 ± 0,31 ^{NSa}	16,07 ± 0,75 ^{NSa}
3	13,49 ± 0,69 ^{ABCb}	16,51 ± 0,55 ^{NSa}	16,44 ± 0,37 ^{NSa}	15,50 ± 0,27 ^{NSa}
5	13,68 ± 0,50 ^{ABb}	16,49 ± 0,21 ^{NSa}	16,16 ± 0,26 ^{NSa}	15,53 ± 0,52 ^{NSa}
7	12,67 ± 0,63 ^{BCb}	16,04 ± 0,58 ^{NSa}	16,37 ± 0,18 ^{NSa}	15,82 ± 0,54 ^{NSa}
10	12,14 ± 0,48 ^{Cb}	16,29 ± 0,49 ^{NSa}	16,39 ± 0,08 ^{NSa}	15,75 ± 0,37 ^{NSa}
<i>b* crosta</i>				
0	36,03 ± 1,09 ^{NSa}	35,21 ± 0,51 ^{ABa}	35,00 ± 0,08 ^{ABa}	32,40 ± 0,79 ^{NSb}
1	33,93 ± 0,97 ^{NSab}	34,56 ± 0,41 ^{Bab}	34,92 ± 0,27 ^{ABa}	32,73 ± 0,82 ^{NSab}
3	34,89 ± 0,42 ^{NSns}	34,35 ± 0,42 ^{BCns}	34,55 ± 0,41 ^{ABns}	31,74 ± 0,97 ^{NSns}
5	33,68 ± 0,59 ^{NSab}	33,27 ± 0,58 ^{Cb}	34,07 ± 0,55 ^{Ba}	31,26 ± 0,77 ^{NSab}
7	34,86 ± 1,20 ^{NSns}	34,56 ± 0,41 ^{Bns}	35,44 ± 0,75 ^{Ans}	33,28 ± 1,04 ^{NSns}
10	35,91 ± 0,75 ^{NSa}	36,17 ± 0,44 ^{Aa}	35,75 ± 0,32 ^{Aa}	33,54 ± 0,74 ^{NSb}

Média de seis replicatas seguido do desvio padrão. Letras diferentes em minúsculo na mesma linha e maiúsculo na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: não significativo.

A luminosidade das crostas variou de 58,85 a 49,56, quanto maior a concentração de IMP mais escuras eram as crostas. A redução do valor L* da crosta é resultado da reação de

Maillard durante o forneamento, potencializada pela inulina. Segundo Bohm et al. (2005), a inulina pode sofrer degradação completa ou parcial em frutose, glicose e sacarose dependendo do tipo de processamento.

Não houve diferença na luminosidade da crosta dos pães com diferentes concentrações de inulina, exceto na concentração de 10%, onde o alto teor de inulina proporcionou pães com coloração mais escura. O a^* da crosta dos pães com IMP apresentou valores superiores ao do controle, demonstrando maior tendência à cor vermelha. Resultados semelhantes foram encontrados por Hager et al. (2011). Em seus experimentos a L^* da crosta controle foi de 56,91 e do pão adicionado de 3% de inulina foi de 47,62.

5.2.4.5 Propriedades térmicas do miolo dos pães com e sem IMP

A Figura 13 mostra que as entalpias de retrogradação dos miolos dos pães com adição de inulina foram maiores que a do pão controle quanto maior foi a concentração de fibra utilizada, durante todo o período de armazenamento. Houve um aumento pronunciado na entalpia do miolo dos pães do primeiro dia de armazenamento até o terceiro dia, principalmente para os pães com fibras. Após três dias de armazenamento, a entalpia das amostras com 7,5% e 10% de IMP tendeu à estabilização, o que ocorreu apenas no 7^o dia para o pão controle e com 5% de IMP.

Resultados semelhantes foram encontrados por Ronda et al. (2014). Em seus estudos sobre o efeito de diferentes tempos de fermentação na taxa de envelhecimento de pães com e sem fibras, os pesquisadores relataram que a cinética de retrogradação dos pães foi significativamente afetada pelo tempo de fermentação e pelas fibras adicionadas, em particular a inulina. A inulina promoveu maior recristalização da amilopectina e foi a responsável por propiciar pães com maior firmeza, mesmo atrasando a migração de água do miolo para crosta durante o envelhecimento. Segundo Santos, Collar e Rosell, (2008), a inulina tem capacidade de interagir com a água, limitando a água disponível para a gelatinização e recristalização do amido, o que provavelmente modifica a estrutura dos cristais produzidos.

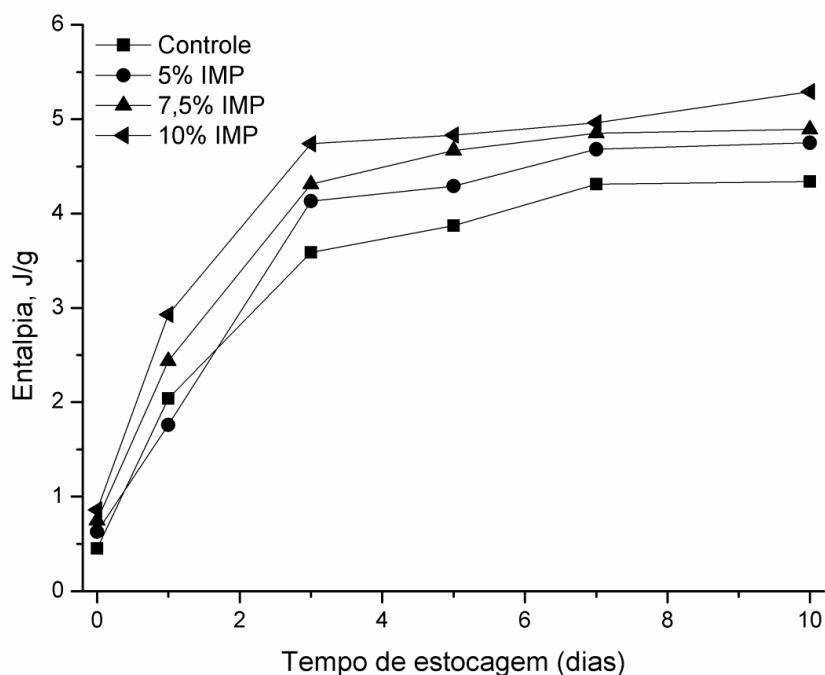


Figura 13: Entalpia de retrogradação da amilopectina no miolo dos pães sem e com IMP durante armazenamento.

Estudos mostram que a equação de Avrami (equação 4) é uma ferramenta útil para entender a cinética de retrogradação do amido (BECK et al., 2011). A constante de velocidade de cristalização é representada por k , enquanto a morfologia do cristal no processo de nucleação é representada por n (ITURRIAGA, LOPES DE MISHIMA e AÑÑON, 2010; KIBAR e GÖNENÇ, 2010).

A Tabela 14 mostra os parâmetros de Avrami durante a retrogradação da amilopectina no miolo dos pães durante estocagem.

Tabela 14: Cinética de retrogradação da amilopectina durante estocagem de pães com e sem IMP.

%IMP	Parâmetros de Avrami				
	ΔH_0	ΔH_∞	n	k (d ⁻ⁿ)	R^2
0	0,45	4,34	0,96	0,53	0,996
5	0,63	4,75	1,42	0,35	0,988
7,5	0,75	4,89	1,15	0,53	0,999
10	0,86	5,29	0,86	0,66	0,988

ΔH_0 = entalpia de retrogradação no tempo 0; ΔH_t = entalpia de retrogradação no tempo “t”; ΔH_∞ = entalpia de retrogradação no tempo ∞ ; k = constante de velocidade ; n = expoente de Avrami; R^2 = ajuste do coeficiente de determinação.

Os valores dos parâmetros k e n da equação de Avrami estão relacionados à cinética de cristalização. Altos valores dessas constantes indicam uma rápida taxa de retrogradação, que é mais perceptível com o aumento de k (ARMERO e COLLAR, 1998). Percebe-se um aumento brusco do n com 5% de IMP, e esse parâmetro diminuiu com o aumento da concentração de IMP. Situação contrária é percebida com o parâmetro k , que diminui e depois aumenta com o aumento da concentração de IMP. Segundo Armero e Collar (1998), altos valores de n e baixos valores de k são frequentemente encontrados, o que demonstra um aumento inicial de cristais e uma lenta cinética de retrogradação. Levando em consideração apenas o k , a concentração de 5% IMP diminuiu a taxa de retrogradação do amido, diferente das amostras com 7,5% de IMP, que apresentaram taxa de retrogradação semelhante ao controle (Tabela 14). Porém, percebe-se que os valores de ΔH_0 e ΔH_∞ das amostras com IMP foi consideravelmente maior que o controle, isso significa que a recristalização inicial e a no tempo infinito são maiores, indicando maior grau de recristalização nesses pães.

5.2.4.6 Padrão de raios-x e cristalinidade relativa do miolo dos pães com e sem IMP

Durante a estocagem de pães, as moléculas do amido (amilose e amilopectina) se reassociam formando uma nova ordem cristalina, apresentando padrões de difração de raios-x típicos de estrutura do tipo B (amido retrogradado), caracterizado pela maior resolução do pico ao redor de 17° em 2θ (AGUIRRE et al. 2011). De acordo com Tian et. al. (2009) padrões cristalinos do tipo B apresentam picos em $5,6^\circ$, $14,9^\circ$, 17° e 22° , enquanto que, o padrão cristalino do tipo V, é caracterizado a partir de picos formados ao redor de $20,1^\circ$, $12,9^\circ$ e $7,4^\circ$, correspondente a formação do complexo de amilose-lipídeo. Os padrões de difração de raios-x dos pães controle e com IMP frescos e com dez dias de armazenamento, estão apresentados nas Figuras 14.

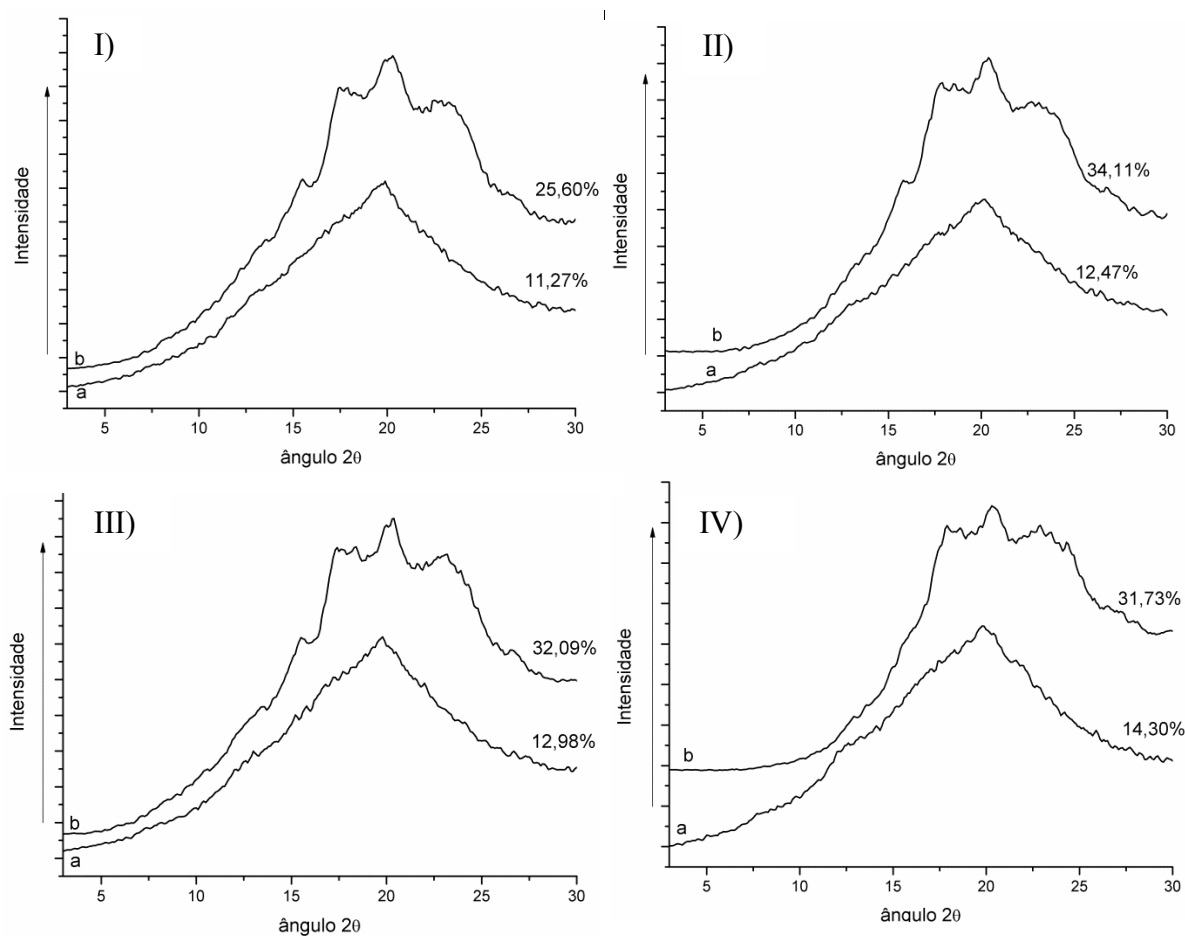


Figura 14: Padrão de difração de raios-X e cristalinidade relativa do miolo dos pães sem e com IMP, frescos e armazenados. I) Controle; II) 5% IMP; III) 7,5% IMP; IV) 10% IMP. a: pães frescos; b: 10 dias de armazenamento.

Os difractogramas do miolo dos pães frescos com e sem IMP praticamente não apresentaram picos característicos de amido retrogradado, apenas um pico em torno de 20° que pode representar a formação do complexo amilose-lipídeo. Após 10 dias de armazenamento os difractogramas exibiram picos mais pronunciados ao redor de 15° , 17° , 20° e 22° , sugerindo uma mistura de padrões do tipo V e B.

O pão controle foi o que apresentou menor cristalinidade tanto no dia 0 quanto no último dia de armazenamento. A cristalinidade relativa dos pães com IMP frescos aumentou significativamente com o aumento na concentração. No décimo dia de armazenamento a cristalinidade dos pães com fibras foi maior que a do pão controle, porém o pão com 5% de IMP apresentou a maior cristalinidade. Esses resultados sugerem que o teor de amido presente na massa afetou a cristalinidade relativa dos pães durante o período de armazenamento. O pão com 5% de IMP teve 34,11% de cristalinidade, dado que correlaciona positivamente ($r = 0,68$,

$p>0,05$) com os dados da equação de Avrami (Tabela 14), onde o número de Avrami (n) também foi maior quando 5% de IMP foi usada, e diminuiu com o aumento do teor de IMP.

5.2.4.7 Firmeza do miolo do pão com e sem IMP

A firmeza dos pães está relacionada com a força aplicada para ocasionar uma deformação ou rompimento da amostra, avaliada por texturômetros mecânicos e correlacionada com a mordida humana durante a ingestão dos alimentos (ESTELLER e LANNES, 2005). A firmeza do miolo dos pães controle e com IMP está apresentada na Figura 15.

A força máxima (firmeza) avaliada para produtos panificados é dependente da formulação (qualidade da farinha, quantidade de açúcares, gorduras, emulsificantes, enzimas e mesmo a adição de glúten e melhoradores de farinha), umidade da massa e conservação (tempo de fabricação do produto e embalagem) (ESTELLER e LANNES, 2005).

As amostras de pães frescos controle e com IMP apresentaram diferença significativa na firmeza do pão, sendo que o pão controle apresentou a menor firmeza (0,96 N) e o pão com 10% de IMP a maior (1,84 N). O aumento da firmeza nos pães aumentou durante o armazenamento e foi maior quanto maior a concentração de IMP, com exceção da amostra com 7,5% IMP que teve um aumento inferior no valor de firmeza se comparado às amostras com outras concentrações de IMP. O aumento da firmeza dos pães com IMP correlaciona negativamente com a tenacidade ($r = -0,88$, $p>0,05$), elasticidade ($r = -0,95$, $p>0,05$) e força ($r = -0,79$, $p>0,05$) (Tabela 5), que mostrou o enfraquecimento da rede de glúten com o uso de IMP, o que diminuiu a expansão da massa conferindo ao pão menor volume e maior firmeza. Segundo Axford et al. (1968) citado por Eliasson (1993), o volume do pão afeta as medidas de firmeza do miolo e assim quanto menor for o volume específico do pão, maior será a firmeza. Além disso, pão com maior conteúdo de umidade no miolo proporcionou pães mais macios ($r = -0,89$, $p>0,05$).

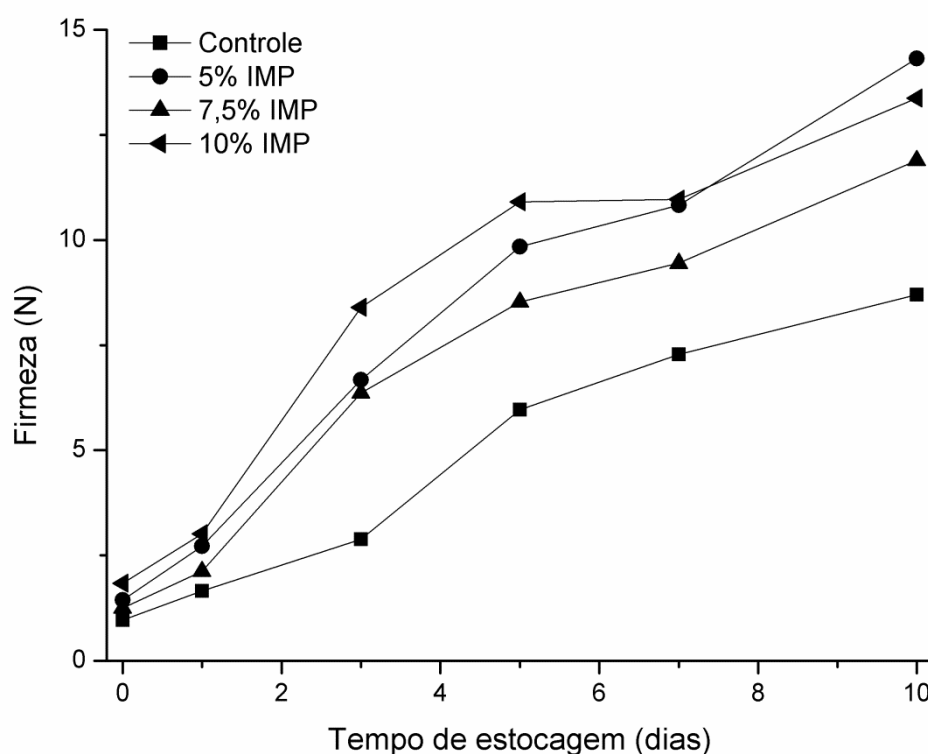


Figura 15: Firmeza (N) dos pães sem e com IMP durante o período de armazenamento.

Resultados semelhantes foram encontrados por Peressini e Sensidoni (2009) e Wang, Rosell e Barber (2002). Esses pesquisadores também encontraram em seus experimentos maior firmeza e menor volume nos pães com inulina. No entanto, o pão com 7,5% de inulina que também mostrou as menores diferenças nas propriedades viscoelásticas e características internas do pão quando comparada ao pão controle, foi o que apresentou a menor firmeza entre os pães com fibra. Segundo Peressini e Sensidoni (2009), o menor efeito das fibras sobre o comportamento viscoelástico das massas é desejável porque ele pode indicar menores mudanças na performance de panificação.

5.2.4.8 Teor de fibras no pão com e sem IMP

A quantificação de fibra solúvel em alimentos processados que contenham frutanos em sua composição é importante, pois para estes compostos servirem como ingrediente para alimentos funcionais, o mesmo deve ser quimicamente estável às condições de processamento, como calor, pH e reações de escurecimento (HUEBNER, 2008). É possível que, após o processamento, a inulina sofra degradação completa ou parcial em frutose, glicose

e sacarose ou ocorra formação de outros compostos similares de menor massa molecular (BOHM et al., 2005).

O teor de fibra solúvel e fibra total das amostras de pães com e sem IMP estão apresentados na Tabela 15.

O pão controle apresentou teor de fibra total de 1,32 g/100 g e baixo conteúdo de fibra solúvel (0,29 g/100g) justificado pelo fato da farinha de trigo apresentar baixos teores dessas fibras (arabinoxilanas solúveis e beta glucanas). Das fibras insolúveis, o pão pode apresentar razoável teor de amido resistente formado após retrogradação do amido.

Tabela 15: Teor de fibras solúvel, insolúvel e total nos pães com e sem IMP.

Amostra	FS (g/100g)	FI (g/100g)	FT (g/100g)
<i>Controle</i>	0,28 ± 0,01 ^d	1,04 ± 0,04 ^a	1,32 ± 0,03 ^d
<i>5% IMP</i>	2,83 ± 0,00 ^c	1,00 ± 0,01 ^a	3,83 ± 0,00 ^c
<i>7,5% IMP</i>	3,60 ± 0,01 ^b	0,91 ± 0,02 ^b	4,51 ± 0,01 ^b
<i>10% IMP</i>	4,60 ± 0,00 ^a	0,96 ± 0,01 ^c	5,56 ± 0,01 ^a

Média de duplicatas seguida de desvio padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). FS: Fibra solúvel; FI: Fibra insolúvel; FT: Fibra total.

A amostra com 5% de IMP apresentou 2,83 g de fibra solúvel em 100 g de amostra, enquanto a amostra com 10% de IMP apresentou 4,6 g/100 g. De acordo com a Resolução RDC nº 54, de 12 de novembro de 2012, “para um alimento ser considerado *Fonte de fibras* ele deve conter no mínimo 3 g de fibra em cada 100 g de produto e para ser considerado *Alto conteúdo de fibras* deve conter no mínimo 6 g”. Assim todas as amostras podem ser consideradas como *Fonte de fibras*.

Segundo Gliobowski e Bukowsha (2011), a estabilidade química da inulina diminui a $\text{pH} \leq 4$ com o aumento do tempo de aquecimento e temperatura. Temperaturas elevadas ($>100^\circ\text{C}$) podem afetar a inulina independentemente do meio, ocasionando sua hidrólise. Além disso, a invertase da levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) pode converter a inulina em moléculas de menor grau de polimerização (frutooligossacarídeos e frutose). Os pesquisadores relatam que quando ocorre degradação, é observada uma perda da atividade prebiótica da fibra.

5.3 EFEITO DO AR NA FARINHA, REOLOGIA DAS MASSAS, QUALIDADE E TAXA DE ENVELHECIMENTO DE PÃES.

5.3.1 Parâmetros reológicos e térmicos da farinha de trigo sem e com AR

5.3.1.1 Parâmetros farinográficos, extensográficos e alveográficos da farinha de trigo sem e com AR.

As propriedades reológicas da farinha de trigo é um dos principais fatores que determinam seu uso final (PIZZINATO, 1997). Os parâmetros farinográficos, extensográficos e alveográficos da farinha de trigo com 0, 10, 15 e 20% de AR, estão apresentados nas Tabelas 16, 17 e 18, respectivamente.

Tabela 16: Parâmetros farinográficos da farinha de trigo controle e adicionada de AR.

Parâmetros	Controle	10% AR	15% AR	20% AR
Absorção de água (%)	58,0	66,0	69,5	72,5
Tempo de chegada (min)	1,4 ± 0,1 ^{ns}	1,4 ± 0,1 ^{ns}	2,1 ± 0,3 ^{ns}	1,5 ± 0 ^{ns}
Desenvolvimento (min)	10,3 ± 0,1 ^a	6,4 ± 0,3 ^c	6,2 ± 0,2 ^c	7,3 ± 0,1 ^b
Estabilidade (min)	17,2 ± 0,3 ^a	14,2 ± 0,3 ^b	10,3 ± 0,4 ^c	15,3 ± 0,7 ^b
ITM (UF*)	10,0 ± 0,1 ^c	27,5 ± 3,5 ^b	30,0 ± 0,1 ^b	40,0 ± 0,0 ^a

Média de três replicatas seguida de desvio padrão. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$ *UF – Unidades Farinográficas. ITM: Índice de tolerância à mistura. ns: não significativo.

Os valores de absorção de água aumentaram substancialmente com o aumento da concentração de AR, indicando que mesmo com menor quantidade de proteína e amido danificado, o AR contribuiu para o aumento da capacidade de absorção de água das misturas farinha-AR. A alta quantidade de água nas massas com AR não afetou estatisticamente o tempo de chegada indicando que independente da concentração de AR todas as massas apresentaram o mesmo tempo para atingir a linha de consistência (500 UF).

A presença de qualquer concentração de AR reduziu significativamente o tempo de desenvolvimento e a estabilidade da massa, enquanto o índice de tolerância à mistura (ITM) aumentou significativamente com o aumento do teor de AR, quando comparadas ao controle. Segundo Atwell (2001), o ITM e o tempo de estabilidade indicam o quanto uma farinha ainda pode ser trabalhada depois do tempo de desenvolvimento. Altos tempos de estabilidade e baixos valores de ITM representam uma farinha forte, boa para panificação. Assim, a farinha

de trigo deve apresentar quantidade e qualidade de proteínas elevadas para suportar o efeito deletério de fibras alimentares (EL DASH, CAMARGO e DIAZ, 1990).

Os resultados mostraram que o AR diluiu a rede de glúten, enfraquecendo a farinha de trigo, conferindo menores tempos para a massa atingir a consistência ideal. Porém, segundo Guarienti (1996), uma farinha que apresente tempo de desenvolvimento entre 6,1 e 8,0 é considerada média-forte enquanto a que apresenta estabilidade entre 10,1 a 15,0 e ITM entre 0 e 50 é considerada forte. Baseado nestes parâmetros, mesmo diminuindo a quantidade de proteínas formadoras de glúten, a mistura de farinha com AR em qualquer concentração apresentou características farinográficas adequadas para produção de pães. Resultados semelhantes foram encontrados por Fu et al. (2008) que trabalharam com AR2 e AR3. Esses autores sugerem que o AR enfraqueceu a rede de glúten, e para produção de pães com AR o uso se farinhas com alto teor proteico é recomendado.

Sanz-Penella et al. (2010) também encontraram aumento da absorção de água quando a farinha de trigo foi substituída por amido de ervilha modificado (com alto nível de AR). Os pesquisadores encontraram valores de até 74,6% de absorção de água quando 30% de AR adicionado. A estabilidade diminuiu com o aumento da concentração de AR, enquanto o ITM aumentou com o aumento da concentração de AR. Os autores também constataram enfraquecimento da rede de glúten, porém, concentrações de até 15% de AR não comprometeram a qualidade geral dos pães produzidos.

A extensografia oferece dados para suplementar as informações fornecidas pelo farinógrafo. Massas preparadas com conteúdos de água que proporcionam a mesma resistência à mistura podem apresentar ampla variação na resistência à extensão. Portanto, a utilização do farinógrafo juntamente com o extensógrafo permite melhor caracterização tecnológica da farinha de trigo (CAUVAIN e YOUNG, 2009). Os parâmetros extensográficos da farinha de trigo com 0, 10, 15 e 20% de AR estão apresentados na Tabela 17.

A resistência à extensão das massas reduziu com a substituição parcial da farinha por AR. O tempo de repouso foi determinante para as amostras com 15 e 20% de AR. Essas amostras necessitaram de maior tempo de repouso (135 min) que as massas controle e com 10% de AR (90 min) para atingir a resistência máxima. Segundo Salvador, Sanz e Fiszman (2006), um nível excessivo de água livre na massa pode aumentar a mobilidade das outras moléculas no meio conferindo massas com menor resistência à extensão.

A extensibilidade praticamente não foi alterada com a substituição da farinha por AR, com exceção das massas com 20% de AR, que apresentaram extensibilidade

significativamente menores durante o tempo de descanso. O valor D das massas controle e com 10 % de AR mostram que tempos curtos foram necessários para o desenvolvimento da rede de glúten, enquanto que nas massas com 15 e 20% de AR, tempo de descanso maiores (135 min) foram necessários.

Os resultados extensográficos no tempo de descanso de 135 min (Tabela 17) mostram que o aumento da concentração de AR à farinha diminuiu gradualmente a resistência à extensão da massa e a extensibilidade com o aumento da concentração de AR. Baseado na classificação proposta por Pizzinato (1997), a farinha controle e as misturas farinha-AR com 10 e 15% de AR podem ser classificadas como fortes. Para este autor, uma farinha pode ser considerada forte quando, a 135 min de repouso, apresenta uma resistência à extensão próxima de 560 UE e extensibilidade em torno de 155 mm.

Tabela 17: Parâmetros extensográficos da farinha de trigo controle e adicionada de AR.

	Controle	10% AR	15% AR	20% AR
<i>R₅₀(UE*)</i>				
45 min	375,0 ± 0,1 ^{Ba}	310,0 ± 14,1 ^{Cb}	320,0 ± 0,1 ^{Cb}	315,0 ± 7,1 ^{Bb}
90 min	555,0 ± 14,1 ^{Aa}	510,0 ± 14,0 ^{Ba}	395,0 ± 7,1 ^{Bb}	395,0 ± 21,2 ^{Ab}
135 min	630 ± 14,1 ^{Aa}	570,0 ± 14,1 ^{Ab}	550,0 ± 1,1 ^{Ab}	465,0 ± 21,0 ^{Ac}
<i>E (mm)</i>				
45 min	135,5 ± 0,7 ^{Bns}	159,5 ± 7,8 ^{Nns}	147,0 ± 7,1 ^{NSns}	141,0 ± 5,7 ^{Ans}
90 min	156,5 ± 4,2 ^{Aans}	143,5 ± 2,1 ^{NSns}	148,0 ± 6,7 ^{NSns}	138,5 ± 4,9 ^{Ans}
135 min	149,5 ± 4,2 ^{Aa}	132,5 ± 10,7 ^{NSab}	130,0 ± 7,1 ^{NSab}	121,0 ± 1,4 ^{Bc}
<i>D (R₅₀/E)</i>				
45 min	2,1 ± 0,1 ^{Ba}	1,9 ± 0,1 ^{Ba}	2,2 ± 0,1 ^{Aa}	2,2 ± 0,1 ^{Ba}
90 min	3,6 ± 0,2 ^{Aa}	3,6 ± 0,1 ^{Aab}	2,7 ± 0,2 ^{Ab}	2,9 ± 0,3 ^{Bb}
135 min	4,2 ± 0,2 ^{Ans}	4,3 ± 0,5 ^{Ans}	4,2 ± 0,1 ^{Bns}	3,9 ± 0,1 ^{Ans}

Média de três replicatas seguida de desvio padrão. Letras diferentes em minúsculo na mesma linha e maiúsculo na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). *UE-Unidades extensográficas. R₅₀: Resistência à extensão; E: Extensibilidade; D: Número proporcional. ns: não significativo.

A diminuição da resistência à extensão e da extensibilidade com o aumento do teor de AR, proporcionou valores D (135 min) estatisticamente semelhantes (4,0). Segundo Oliveira et al. (2010), a farinha ideal para produção de pão deve apresentar equilíbrio entre a elasticidade e a extensibilidade, para assim poder suportar a pressão exercida pelo gás carbônico produzido durante a fermentação, e para que a massa sofra deformação adequada para a formação da estrutura do miolo dos pães. Os resultados deste trabalho mostraram que nas concentrações de 10 e 15% o AR afetou levemente a resistência à extensão e a extensibilidade da massa, podendo proporcionar pães com volume semelhante ao controle.

Os parâmetros alveográficos da farinha de trigo com 0, 10, 15 e 20% de AR, estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Parâmetros alveográficos da farinha de trigo controle e adicionada de AR.

<i>Parâmetros</i>	Controle	10% AR	15% AR	20% AR
P (mm H ₂ O)	93,60 ± 4,45 ^d	101,65 ± 0,92 ^c	120,10 ± 1,13 ^b	133,50 ± 0,99 ^a
L (mm)	77,5 ± 2,10 ^a	61,0 ± 2,80 ^s	51,0 ± 4,40 ^c	33,5 ± 2,10 ^d
W (x 10 ⁻⁴ J)	278,94 ± 15,48 ^a	247,66 ± 8,40 ^b	235,65 ± 1,09 ^b	317,75 ± 1,34 ^a
P/L	1,21 ± 0,09	1,67 ± 0,09	2,36 ± 0,04	3,99 ± 0,28

Média de duas replicatas seguida de desvio padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). P: tenacidade L: extensibilidade; W: força.

A tenacidade (P), expressa em mm, é a pressão máxima necessária para expandir a massa e está relacionada à capacidade de absorção de água da farinha, enquanto a extensibilidade (L) é a capacidade de extensão da massa sem que ela se rompa predizendo dessa forma, o volume do pão (MIRANDA, MORI e LORINI, 2009). A tenacidade aumentou com o aumento no teor de AR corroborando com os valores de absorção de água da farinha obtidos nos testes farinográficos (Tabela 16), enquanto a extensibilidade diminuiu atingindo 33,5 mm com 20% de AR.

Entre as outras variáveis que expressam grande influência na determinação de uso da farinha está a relação P/L. De acordo com Brasil (2010), para produção de pães, a relação P/L ideal deve ser entre 0,5 a 1,2. Com base nesse indicativo é possível perceber que a amostra controle apresenta ótimo equilíbrio entre tenacidade e extensibilidade, podendo assim suportar, por exemplo, o efeito deletério das fibras. Com aumento do teor de AR a relação P/L aumentou com o aumento da concentração de fibra atingindo 3,99 com 20% de AR. De forma geral, é possível identificar que as amostras controle e com 10% de AR estão mais próximas dos valores indicados para produção de pão, apesar de apresentarem o valor de P/L pouco acima do recomendado.

A força de glúten ($W \times 10^{-4}$ J) representa o trabalho de deformação da massa indicando a qualidade de panificação da farinha (força da farinha) (PIZZINATO, 1997; MIRANDA, MORI e LORINI, 2009). A força das misturas farinha-AR diminuiu em relação ao controle quando 10 e 15% de AR foram adicionadas e aumentou com 20% de AR, atingindo 317,75 x 10⁻⁴J. De acordo com a legislação brasileira (BRASIL, 2010), todas as amostras apresentaram valores de W adequados para a fabricação de pão ($W > 220 \times 10^{-4}$ J). Porém apenas a força (W) não é suficiente para determinar a qualidade de panificação. A

amostra com 20% de AR, além de apresentar elevado valor de W, apresentou também uma relação P/L (3,99) muito elevada, impedindo a expansão da massa.

5.3.1.2 Propriedades de pasta da farinha de trigo sem e com AR

De acordo com Thomas e Atwell (1999), as mudanças que ocorrem nos grânulos durante a gelatinização e retrogradação são os principais determinantes do comportamento de pasta do amido. As propriedades de pasta da farinha de trigo com 0, 10, 15 e 20% de AR estão apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19: Perfil viscoamilográfico obtido em RVA das amostras de farinha com AR.

Amostras	Temp. pasta (°C)	Viscosidades (RVU)			
		Pico	Quebra	Final	Setback
Controle	94,38 ± 0,11 ^{ns}	214,84 ± 8,72 ^a	59,17 ± 2,12 ^a	274,83 ± 8,84 ^a	119,17 ± 2,24 ^a
AR10	94,03 ± 0,46 ^{ns}	158,29 ± 2,18 ^b	52,88 ± 1,70 ^b	215,50 ± 2,23 ^b	105,08 ± 1,06 ^b
AR15	93,73 ± 0,18 ^{ns}	132,33 ± 0,71 ^c	38,71 ± 1,12 ^c	189,17 ± 2,24 ^c	96,04 ± 0,30 ^c
AR0	93,75 ± 0,00 ^{ns}	105,05 ± 2,16 ^d	27,59 ± 0,59 ^d	163,51 ± 1,43 ^d	85,79 ± 0,06 ^d

Média de três replicatas seguida de desvio padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: não significativo.

O AR, independente da concentração, não afetou a temperatura de pasta da farinha, mas diminuiu gradativamente as viscosidade de pasta e a tendência à retrogradação. Esses resultados podem ser explicados pelo fato do AR não se gelatinizar nas condições experimentais e assim permanecer inerte durante a análise. A temperatura de pasta determina o início do inchamento dos grânulos de amido aumentando sua viscosidade. As amostras analisados apresentaram temperatura de pasta por volta dos 94 °C.

Segundo a empresa fornecedora, o AR usado neste trabalho é um amido de milho com alto teor de amilose. Sendo assim, este amido apresenta pouca mobilidade molecular devido ao denso empacotamento das moléculas lineares, necessitando de alta temperatura para que suas ligações sejam rompidas e se estabeleçam novas ligações com a água (WEBER, COLLARES-QUEIROZ e CHANG, 2009). A faixa de temperatura de gelatinização deste amido esteve entre (111,58 °C a 141,24 °C, Tabela 20), valor bem superior às temperaturas usadas neste experimento (máximo de 95 °C). Desse modo, o AR ficou praticamente inerte não afetando a temperatura de pasta das amostras. Ao se substituir parte da farinha por AR, reduziu-se a concentração de amido capaz de gelatinizar nas condições do experimento,

justificando assim os valores reduzidos das viscosidades apresentadas pelas misturas farinha-AR. Resultados semelhantes foram encontrados por Sanz-Penella et al. (2010) e Fu et al. (2008) quando analisaram as propriedades de pasta de misturas de farinha e amido resistente.

5.3.1.3 Propriedades térmicas da farinha de trigo sem e com AR

Os parâmetros térmicos de gelatinização e retrogradação da farinha de trigo, do AR e da farinha com 10, 15 e 20% de AR estão apresentados nas Tabelas 20 e 21, respectivamente.

A faixa de temperatura de gelatinização do AR foi de 111,58 a 141,24 °C (Tabela 20), valores estes superiores ao encontrado para a farinha de trigo (58,77 a 69,44°C). Este valor garante a não gelatinização do AR durante o forneamento, o que tiraria a função do AR no pão.

Tabela 20: Propriedades térmicas de gelatinização e formação do complexo amilose-lipídeo da farinha de trigo, AR e misturas farinha-AR.

Gelatinização				
Farinha	T ₀ (°C)	T _p (°C)	T _f (°C)	ΔH (J/g)
AR	111,58 ± 2,10	126,40 ± 0,66	141,24 ± 0,07	8,42 ± 0,27
Controle	58,77 ± 0,17 ^{ns}	64,28 ± 0,10 ^a	69,44 ± 0,31 ^a	8,15 ± 0,12 ^c
10 % AR	58,26 ± 0,10 ^{ns}	63,48 ± 0,10 ^b	68,47 ± 0,11 ^{ab}	8,71 ± 0,46 ^{bc}
15 % AR	58,13 ± 0,43 ^{ns}	63,65 ± 0,36 ^b	69,02 ± 0,66 ^{ab}	9,02 ± 0,12 ^b
20 % AR	58,17 ± 1,46 ^{ns}	63,54 ± 0,17 ^b	67,95 ± 0,74 ^b	9,78 ± 0,30 ^a
Complexo amilose-lipídeo				
Farinha	T ₀ (°C)	T _p (°C)	T _f (°C)	ΔH (J/g)
Controle	86,98 ± 0,17 ^{ns}	90,88 ± 0,10 ^{ns}	99,12 ± 0,31 ^b	1,53 ± 0,12 ^d
10 % AR	84,93 ± 0,48 ^{ns}	89,09 ± 0,09 ^{ns}	102,60 ± 1,10 ^a	2,03 ± 0,10 ^c
15 % AR	85,30 ± 0,41 ^{ns}	90,59 ± 2,66 ^{ns}	102,45 ± 0,26 ^a	2,21 ± 0,07 ^b
20 % AR	85,06 ± 0,18 ^{ns}	89,14 ± 0,01 ^{ns}	101,60 ± 0,25 ^{ab}	2,60 ± 0,01 ^a

Média de três replicatas seguida do desvio-padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). T₀, T_p, T_f = temperaturas inicial, de pico e final, respectivamente; ΔH = variação de entalpia. ns: não significativo.

A substituição parcial da farinha por AR causou leve redução nas temperaturas de pico de gelatinização do amido presente na farinha, independente da concentração de AR, e redução na temperatura final de gelatinização da amostra adicionada de 20% de AR. Esses resultados parecem estar relacionados com o caráter inerte do AR diminuindo a quantidade de amido de trigo na amostra total. As entalpias de gelatinização do amido aumentaram levemente quando 15 e 20% de AR foram utilizados. O AR não interferiu nas temperaturas iniciais e de pico do complexo amilose-lipídeo, mas a temperatura final e a entalpia

aumentaram. Como apresentado, a temperatura de gelatinização do AR é superior à da farinha de trigo, e o fato do AR estar disperso na farinha durante a análise térmica pode ter elevado a energia necessária para dissociação das cadeias do amido e do complexo amilose-lipídeo presente na farinha, o que promoveu um leve aumento nos valores de entalpia com o aumento da concentração de AR na farinha de trigo.

A retrogradação do amido é o processo no qual as moléculas gelatinizadas do amido se reassociam formando uma estrutura cristalina de dupla hélice (CAUVAIN e YOUNG, 2009). Os valores da temperatura de fusão e entalpia do amido retrogradado apresentados na Tabela 21 foram inferiores àqueles de gelatinização (Tabela 20). Isso acontece porque a estrutura do amido recristalizado não é tão forte quanto a do amido nativo, com isso, a dissociação acontece com menor força do que no primeiro aquecimento (ELIASSON, 1993).

Tabela 21: Propriedades térmicas de retrogradação da farinha de trigo e formação do complexo amilose-lipídeo sem e com AR.

Amido					
Farinha	T ₀ (°C)	T _p (°C)	T _f (°C)	ΔH _{ret} (J/g)	TR (%)
Controle	45,43 ± 0,99 ^a	55,04 ± 0,04 ^a	68,38 ± 1,90 ^a	0,73 ± 0,02 ^c	8,95 ± 0,16 ^{ns}
10 % AR	42,87 ± 0,36 ^b	50,83 ± 0,77 ^b	65,24 ± 0,08 ^b	0,76 ± 0,03 ^{bc}	8,76 ± 0,74 ^{ns}
15 % AR	42,20 ± 0,89 ^b	51,29 ± 0,35 ^b	65,34 ± 0,14 ^b	0,80 ± 0,02 ^b	8,88 ± 0,37 ^{ns}
20 % AR	42,67 ± 0,65 ^b	51,95 ± 0,10 ^b	65,55 ± 0,13 ^b	0,85 ± 0,01 ^a	8,73 ± 0,31 ^{ns}
Complexo amilose-lipídeo					
Farinha	T ₀ (°C)	T _p (°C)	T _f (°C)	ΔH (J/g)	-
Controle	90,18 ± 0,67 ^a	97,08 ± 2,09 ^a	100,50 ± 0,40 ^{ns}	1,35 ± 0,05 ^c	-
10 % AR	85,45 ± 0,83 ^b	94,19 ± 0,17 ^b	99,74 ± 0,39 ^{ns}	1,94 ± 0,02 ^b	-
15 % AR	84,08 ± 0,16 ^b	93,80 ± 0,53 ^b	99,79 ± 0,27 ^{ns}	2,23 ± 0,03 ^a	-
20 % AR	85,59 ± 2,89 ^b	94,36 ± 0,17 ^b	99,57 ± 1,11 ^{ns}	2,32 ± 0,09 ^a	-

Média de três replicatas seguida do desvio-padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). T₀, T_p, T_f = temperaturas inicial, de pico e final, respectivamente; ΔH = variação de entalpia. TR = Taxa de retrogradação ($\Delta H_{ret}/\Delta H_g \cdot 100$). ns: não significativo.

Houve redução nas temperaturas de fusão do amido recristalizado quando o AR foi adicionado. Isso se deve possivelmente a menor quantidade de amilopectina recristalizada presente nas amostras com AR. A amilopectina possui uma estrutura com menores regiões amorfas e maiores regiões cristalinas, e, portanto, necessita de maior temperatura que a amilose para a fusão de seus cristais (SINGH et al., 2003).

O ΔH_{ret} das amostras com 15 e 20% de AR, foram estatisticamente maiores que aquele as farinha controle (Tabelas 21), indicando maior energia necessária para dissociação das moléculas de amido recristalizado. Esses resultados poderiam sugerir maior taxa de

retrogradação das amostras com AR, porém a taxa de retrogradação (%TR) não diferiu significativamente entre as amostras, sugerindo que pães com AR podem apresentar maciez semelhante aos pães controle.

Apesar do ΔH do complexo de todas as amostras na retrogradação terem sido levemente inferior àqueles da gelatinização (Tabela 20), as temperaturas de pico foram superiores refletindo o maior comprimento helicoidal do complexo e consequentemente sua maior estabilidade física (KAWAI et al., 2012). Segundo Elliasson (2004), as condições para formação do complexo após o primeiro aquecimento são melhores para a formação do complexo amilose-lipídeo.

5.3.2 Ensaios reológicos oscilatórios da massa sem e com AR

Como discutido anteriormente no item 5.2.2, os ensaios oscilatórios para avaliação da faixa de viscoelasticidade linear foram realizados nas frequências de 1 e 10 rad/s, sendo utilizadas a massa controle e aquela com 20% de AR. O valor de 5×10^{-4} s, foi considerado um valor seguro para garantir que todas as análises estariam no limite do comportamento viscoelástico linear em ambas as frequências (Figura 16).

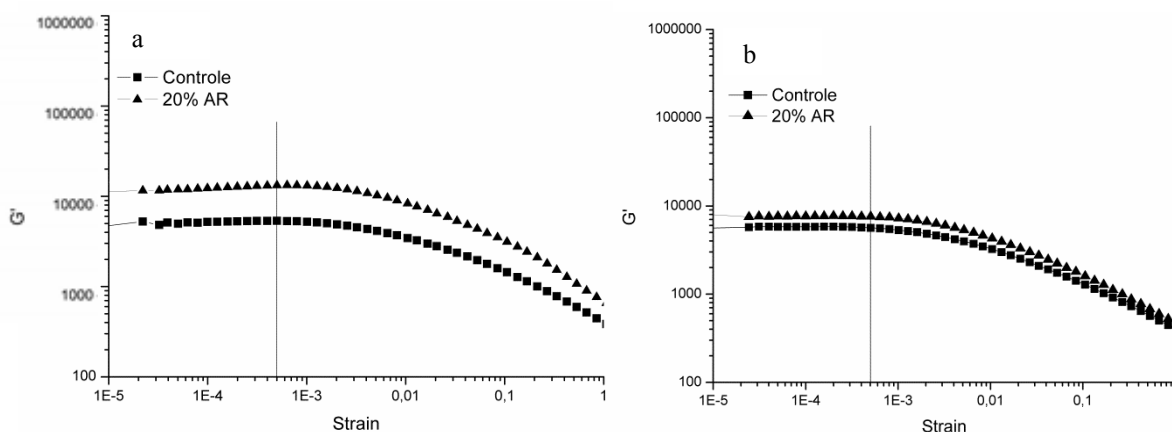


Figura 16: Região de viscoelasticidade linear das massas controle e com 20% de AR nas frequências de (a) 1 rad/s e (b) 10 rad/s.

A massa de pão apresenta comportamento viscoelástico, possuindo propriedades intermediárias entre um sólido (elástico) e um líquido (viscoso) (SALVADOR, SANZ e FISZMAN, 2006).

Os parâmetros reológicos do glúten são capazes de indicar a qualidade do trigo. Glúten de boa qualidade para panificação são reologicamente caracterizados como mais elásticos e menos viscosos do que aqueles de menor qualidade (KHATKAR e SCHOFIELD, 1995) e, portanto apresentam o G' menos dependente da frequência do que o glúten de menor qualidade (JANSSEN, Van VLIET e VEREIJKEN, 1996).

Todas as amostras avaliadas apresentaram G' maior que G'' , os quais foram pouco dependentes da frequência, indicando que as massas se comportaram mais como um sólido, isto é, as deformações foram essencialmente elásticas ou recuperáveis (Figuras 17 e 18). No entanto, a massa controle apresentou maiores valores de G' e G'' que aquelas adicionadas de AR, mostrando maior força de gel. Segundo Khatkar e Schofield (2002), o amido é capaz de interagir com o glúten e assim contribuir para uma resposta mais elástica nas massas. Porém, como discutido anteriormente, o AR agiu como uma fibra inerte, não sendo capaz de interagir com outros componentes da massa e assim, uma menor resposta nos módulos, em relação ao controle, foi obtida.

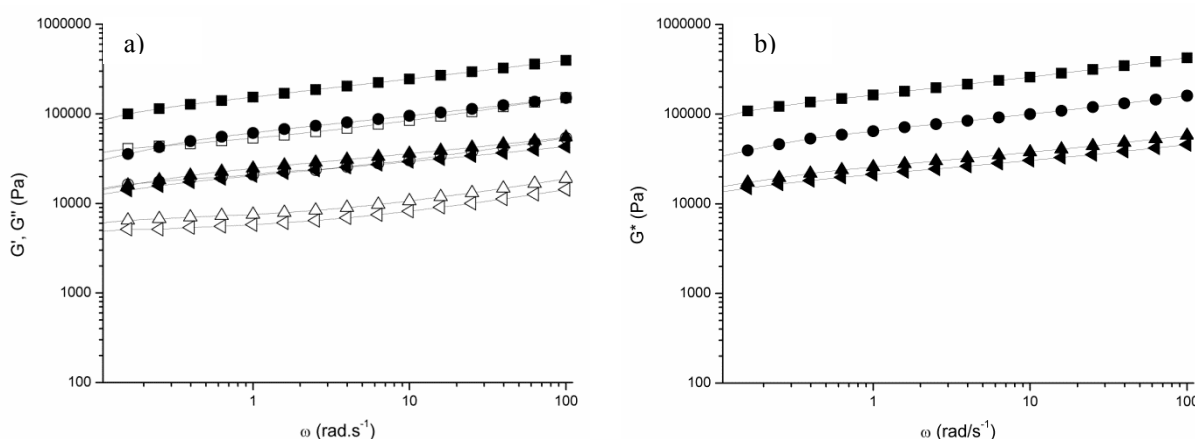


Figura 17: a) Módulos de armazenamento, G' (símbolos fechados), e módulo de dissipação, G'' (símbolos abertos), para as amostras de massas de pães com 0 (■, □); 10% (●, ○); 15 (▲, △) e 20% (◄, ◁) de AR. b) módulo complexo, G^* : 0 (■), 10% (●), 15 (▲) e 20% (◄) de AR. Quantidade de água e tempo de desenvolvimento ideal para cada amostra.

Quando as massas foram preparadas com as quantidades de água e tempos de desenvolvimento obtidos dos testes farinográficos, os valores de G' e G'' das massas com AR (Figura 17a) diminuíram gradualmente em relação ao controle, com exceção da amostra com 20% de AR que mostrou G' e G'' muito próximos àqueles da amostra com 15% de AR. Ao analisar o G^* (Figura 17b) observa-se que a presença de AR reduziu a consistência do gel, e

as massas com 15 e 20% de AR foram as mais afetadas, porém ambas apresentaram comportamento semelhante. Esses resultados confirmam o enfraquecimento da massa devido à diluição da farinha pelo AR.

Com o preparo das massas em condições fixas (quantidade de água 58% e tempo de desenvolvimento 10,3 min), os módulos G' e G'' das massas com AR foram menores que aqueles da massa controle, mas nas concentrações de 10 e 15% de AR o comportamento das mesmas foi muito semelhante (Figura 18a). Esses módulos também foram ligeiramente maiores quando comparados aos das massas preparadas com as quantidades ideais de água e tempo de desenvolvimento. Esses resultados sugerem que a menor quantidade de água usada quando as condições foram fixas, provavelmente diminuiu a lubrificação entre as moléculas, conferindo G' , G'' e G^* maiores do que aqueles apresentados na Figura 17a.

Em ambos os ensaios, com massas preparadas em condições adequadas obtidas dos testes farinográficos (Figura 19a) e com massas preparadas usando condições fixas (Figura 19b), praticamente nenhuma diferença foi observada na variável $\tan \delta$ para as amostras controle e com 15% de AR, enquanto ela foi levemente maior que o controle quando 10% de AR foi utilizado e levemente menor para amostras com 20% de AR. Esses resultados sugerem que a adição de AR não provocou grandes alterações na estrutura da massa (PERESSINI e SENSIDONI, 2009) confirmando seu efeito diluente, o qual induziu a pequenas mudanças nas suas propriedades reológicas.

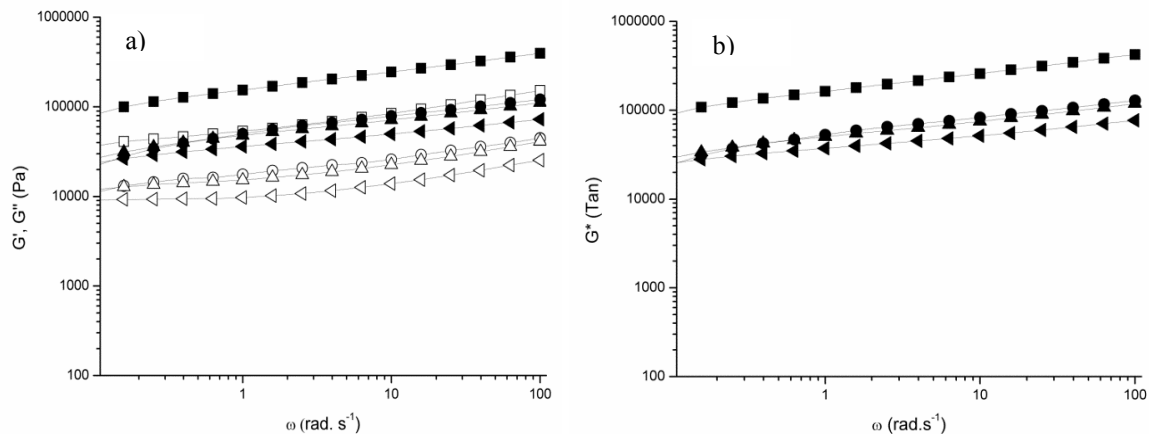


Figura 18: a) Módulos de armazenamento, G' (símbolos fechados), e módulo de dissipação, G'' (símbolos abertos), para as amostras de massas de pães nas concentrações de 0 (■, □), 10% (●, ○), 15(▲, △) e 20% (◀, ◁) de AR. b) módulo complexo, G^* : 0 (■), 10% (●), 15% (▲) e 20% (◀) de AR. Quantidade de água e tempo de desenvolvimento fixos.

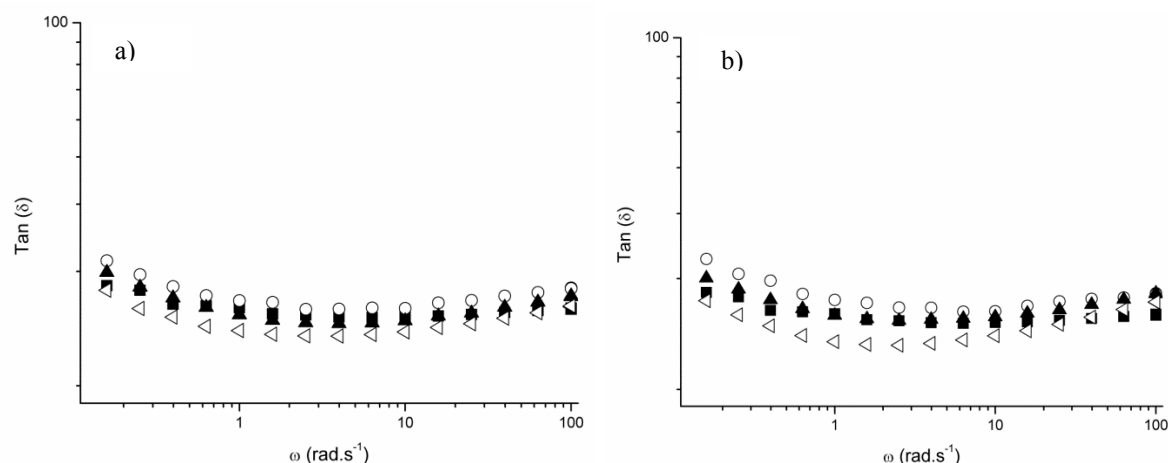


Figura 19: Tangente do ângulo de fase (δ) para massas nas concentrações de 0 (■); 10% (○); 15 (▲) e 20% (◁) de AR. a) Quantidade de água e tempo de desenvolvimento ideal para cada amostra; b) Quantidade de água e tempo de desenvolvimento fixos.

O modelo da Lei da Potência (equações 1, 2 e 3) foi aplicado para estimar os parâmetros reológicos empíricos (k e n). O modelo ajustou-se muito bem aos dados ($R^2 > 0,935$). Os valores de índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e coeficiente de determinação do modelo da lei da potência (R^2) para o G' , G'' e G^* das amostras com quantidade de água de acordo com o farinógrafo e com quantidade fixa são mostrados nas Tabelas 22a e 22b respectivamente.

Tabela 22a: Valores de índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e coeficiente de determinação do modelo da lei da potência (R^2) para G' , G'' e G^* das amostras com água de acordo com o farinógrafo.

Parâmetros	Controle	10% AR	15% AR	20% AR
k' (Pa s ⁿ)	151.619,40 ± 20.325,85	58.909,60 ± 4.456,60	23.787,30 ± 1.492,88	19.900,80 ± 426,87
n' (-)	0,209 ± 0,009	0,205 ± 0,001	0,180 ± 0,004	0,168 ± 0,001
R^2	0,999	0,996	0,997	0,993
k'' (Pa s ⁿ)	53.158,04 ± 4.046,09	20.637,01 ± 661,73	7.528,27 ± 348,74	5.843,54 ± 77,37
n'' (-)	0,223 ± 0,018	0,204 ± 0,001	0,188 ± 0,019	0,183 ± 0,011
R^2	0,991	0,985	0,963	0,962
k^* (Pa s ⁿ)	160.775,60 ± 20.558,46	62.470,25 ± 2.133,03	24.972,00 ± 1.519,40	20.755,53 ± 427,53
n^* (-)	0,211 ± 0,011	0,204 ± 0,001	0,181 ± 0,004	0,170 ± 0,001
R^2	0,999	0,990	0,997	0,999

Média de duas replicatas seguida do desvio-padrão. ' valores referentes ao G' ; '' valores referentes ao G'' ; * valores referentes ao G^*

Tabela 22b: Valores de índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e coeficiente de determinação do modelo da lei da potência (R^2) para G' , G'' e G^* das amostras com teor de água fixo.

Parâmetros	Controle	10% AR	15% AR	20% AR
k' (Pa s ^{n'})	151.619,40 ± 20.325,85	48.074,20 ± 35,20	46.417,80 ± 3.180,58	35.252,90 ± 129,20
n' (-)	0,209 ± 0,009	0,203 ± 0,001	0,189 ± 0,001	0,155 ± 0,002
R^2	0,999	0,985	0,998	0,998
k'' (Pa s ^{n''})	53.158,04 ± 4.046,09	17.371,40 ± 36,26	15.287,28 ± 1.192,78	10.014,29 ± 114,59
n'' (-)	0,223 ± 0,018	0,199 ± 0,001	0,204 ± 0,001	0,188 ± 0,002
R^2	0,991	0,992	0,972	0,935
k^* (Pa s ^{n*})	160.775,60 ± 20.558,46	51.158,30 ± 45,52	48.912,10 ± 3.393,29	36.685,30 ± 154,18
n^* (-)	0,211 ± 0,011	0,202 ± 0,000	0,190 ± 0,001	0,158 ± 0,002
R^2	0,999	0,993	0,998	0,997

Média de duas replicatas seguida do desvio-padrão. ' valores referentes ao G' ; '' valores referentes ao G'' ; * valores referentes ao G^*

Os índices de consistência (k' , k'' e k^*) diminuíram com o aumento da concentração de AR, em ambos os ensaios. Houve uma redução superior a 87% no índice de consistência (k^*) das massas para ambos os ensaios quando 20% de AR foi utilizado na massa. Esses resultados indicam que independente das condições utilizadas no estudo, o aumento do teor de AR interferiu na formação da rede proteica e diminuiu a consistência da massa

O valor de n pode fornecer informações úteis sobre a natureza viscoelástica do material. Nas condições ideais (Tabela 22a) percebe-se que o índice n não apresentou grande variação para amostra controle e com 10% AR. Nas concentrações de 15 e 20% de AR o n diminuiu, porém houve maior discrepância entre os valores de n' e n'' , indicando que as curvas de G' e G'' em função da frequência não são paralelas e, portanto, que a massa não se comporta como um gel verdadeiramente elástico. Essa discrepância entre os valores de n' e n'' é mais acentuada nas massas preparadas com 15 e 20% de AR utilizando as condições fixas (Tabela 22b).

5.3.3 Microscopia confocal de varredura a laser das massas com e sem AR

A análise de microestrutura em massas de pães é uma ferramenta útil para mostrar o aspecto da massa depois da mistura tais como a homogeneização dos ingredientes (a distribuição uniforme de todos os ingredientes principais, formação do glúten e posição do amido em relação ao volume da massa) e compreender os danos causados pela adição de

outros ingredientes, especialmente ao glúten, que se afetada, poderá trazer consequências na qualidade dos pães (PEIGHAMBARDOUST et al., 2006).

A Figura 20 mostra a microestrutura das massas controle e com 15% de AR observadas em microscópio confocal de varredura a laser. Nas imagens, a fase proteica pode ser visualizada em vermelho, os grânulos de amido em verde, e os buracos negros são as bolhas de ar (PERESSINI e SENSIDONI, 2009).

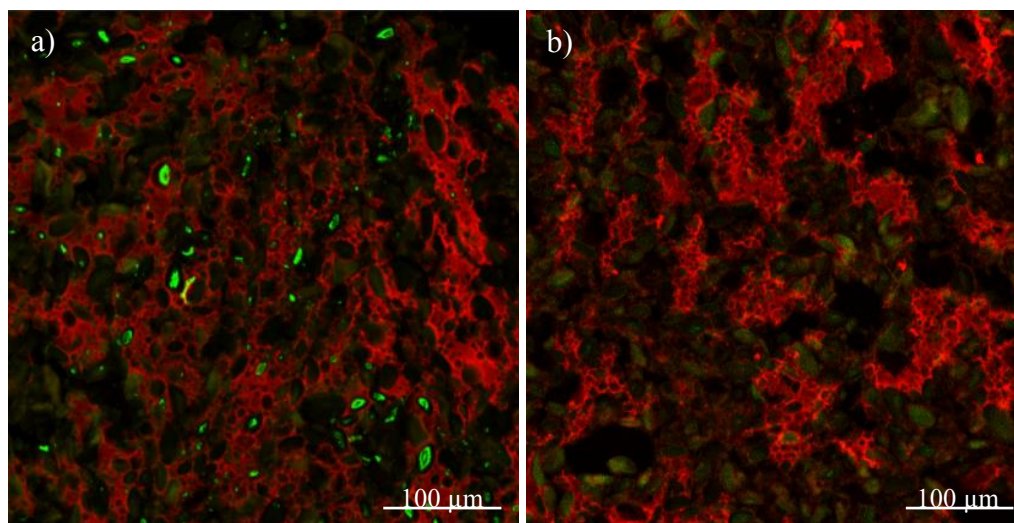


Figura 20: Micrografias das massas de pão obtidas em microscópio de varredura a laser confocal em 3D: a) massa controle; b) massa com 15% de AR. verde: grânulos de amido; vermelho: proteínas.

Ambas as imagens mostram uma fase contínua e homogênea característica do glúten. No entanto, pode se observar na massa controle (Figura 20 a) uma rede mais homogênea com melhor distribuição dos grânulos de amido, enquanto na massa com 15% de AR (Figura 20 b) uma separação distinta da rede proteica em uma fase rica em proteína mais dispersa rodeando os grânulos de amido aglomerados pode ser observada, indicando que o AR diluiu a farinha e promoveu leve enfraquecimento da massa. Esses resultados concordam com aqueles observados durante os ensaios reológicos das massas (Figura 17 e 19).

5.3.4 Avaliação tecnológica e estudo de envelhecimento

5.3.4.1 Volume e pH das massa sem e com AR

Segundo El-Dash, Camargo e Diaz (1990) o glúten deve ter extensibilidade suficiente para expandir sobre influência do CO₂ formado durante a fermentação, contribuindo para o volume do pão, mas também dando o grau ótimo de resistência à extensão para poder reter sua forma. A resistência à extensão muito pequena resulta em uma massa que não retém CO₂, pois a quantidade de gás torna-se insuficiente para expandir a massa a um volume ótimo. O pH e o volume da massa controle e daquelas com AR, durante o período de fermentação estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: pH das massas antes e após fermentação e volume das massas de pão sem e com AR.

Massa	pH _{inicial}	pH _{final}	Volume (mL)
Controle	5,46 ± 0,01 ^{ns}	5,27 ± 0,01 ^{ns}	366,67 ± 15,28 ^a
10 % AR	5,50 ± 0,01 ^{ns}	5,27 ± 0,03 ^{ns}	326,67 ± 11,55 ^b
15 % AR	5,51 ± 0,04 ^{ns}	5,29 ± 0,02 ^{ns}	360,00 ± 17,32 ^{ab}
20 % AR	5,52 ± 0,03 ^{ns}	5,30 ± 0,03 ^{ns}	286,67 ± 5,77 ^c

Média de três replicatas seguida do desvio-padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: diferença não significativa.

O pH das massas foi medido no início e após o término da fermentação. Foi observado para todas as massas estudadas que o AR não interferiu no pH inicial e final da massa.

O volume da massa controle não diferiu estatisticamente da massa com 15% de AR. A redução no volume das massas com AR ocorreu de forma aleatória, sendo a concentração de 20% a mais deletéria reduzindo o volume da massa em 20,81 % em relação ao volume da massa controle.

5.3.4.2 Volume específico dos pães sem e com AR

O volume específico do pão é um fator importante no que se referem à aceitabilidade do produto pelos consumidores. Sua importância está relacionada à qualidade do produto, uma vez que é afetado, principalmente pela qualidade da farinha de trigo (EL-DASH; CAMARGO; DIAZ, 1990).

O volume específico dos pães controle e com AR variou de 4,50 a 6,02 cm³/g (Tabela 24). A concentração de até 15 % de AR à massa foi responsável por torná-la menos elástica, porém não alterou a Relação D (elasticidade/extensibilidade) em relação ao controle (Tabela 17), tornando-a, portanto, capaz de reter CO₂ durante a fermentação e resultando em pão com volume específico semelhante ao controle.

Já a concentração de 20% de AR na massa, mesmo com valores de D e P/L adequados, pode ter sido excessivo e prejudicado a rede de glúten, dificultando a expansão da massa durante fermentação e forneamento, conferindo pães com menores volumes específicos.

Tabela 24: Volume específico dos pães sem e com AR.

Pão	Volume específico (cm ³ /g)
Controle	6,02 ± 0,16 ^a
10 % AR	5,58 ± 0,08 ^b
15 % AR	5,72 ± 0,05 ^{ab}
20 % AR	4,50 ± 0,15 ^c

Média de nove replicatas seguida do desvio-padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

Esses dados corroboram com os resultados de G' e G'' (Figura 17 a). Segundo Khatkar e Schofield (2002), os valores de G' e G'' tem correlação positiva com o volume de pães, quanto menor a diferença entre o modulo de armazenamento e módulo de dissipação melhor será o volume dos pães. Dos dados observados (Figura 17 a), a amostra com 20% de AR foi a que apresentou maior diferença entre os módulos G' e G''. Os resultados de volume específico também concordam com aqueles observados para tan (δ), que para as massas controle e com 15% de AR praticamente não diferiram (Figura 19 a) mostrando que a adição de 15% de AR não interferiu na estrutura da massa possibilitando um pão com bom volume específico.

Ao analisar as imagens dos pães (Figura 21), é possível observar que os pães com até 15% de AR apresentaram uniformidade do miolo e formato externo mais próximo do pão controle. Sanz-Penella et al. (2010) observaram em seus estudos que quanto maior a concentração de AR (10 a 30%) em substituição à farinha, menor era o volume específico dos pães, porém os valores encontrados por estes pesquisadores estão relacionados com a qualidade da farinha usada por eles, a qual apresentou menor tempo de desenvolvimento (3,75 min) e menor estabilidade (7,48 min) que a usada em nosso estudo, ou seja, a farinha não teve força suficiente para suportar o AR.



Controle

10% AR

15% AR

20% AR

Figura 21: Características internas dos pães com e sem AR.

5.3.4.3 Umidade e atividade de água dos pães sem e com AR

Os teores de umidade do miolo e da crosta dos pães frescos e armazenados sem e com AR estão apresentados na Figura 22.

O AR não alterou o conteúdo de umidade dos pães frescos, com exceção do pão adicionado de 20% que apresentou teor de umidade superior aos demais. Esses resultados correlacionam positivamente ($r = 0,80$, $p > 0,05$) com os resultados de absorção de água da farinha de trigo ou mistura farinha-AR (Tabela 16). Os pães com AR tiveram maior teor de água no miolo até o décimo dia de armazenamento. Porém, como era esperado, ocorreu migração da umidade do miolo para a crosta para todos os pães. Resultados semelhantes foram encontrados por Sanz-Penella et al. (2010) que observaram um aumento significativo da umidade nos pães com AR.

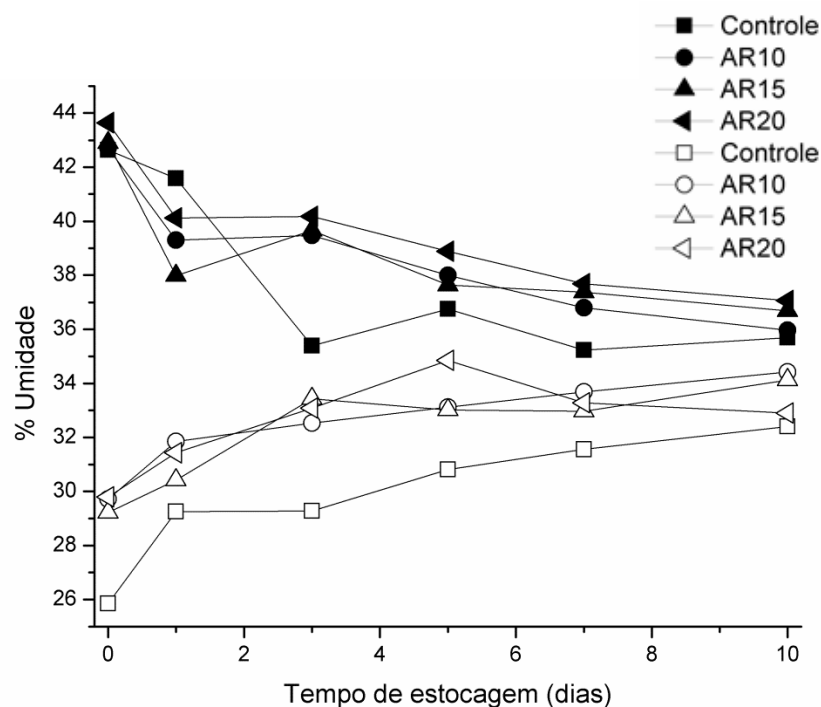


Figura 22: Teor de umidade do miolo (símbolos fechados) e da crosta (símbolos abertos) dos pães sem e com AR durante armazenamento.

A atividade de água do miolo e da crosta dos pães controle e com AR está apresentada na Figura 23.

A atividade de água dos miolos e das crostas foram maiores que aquelas do pão controle quanto maior a concentração de AR utilizada. De um modo geral, assim como observado para o teor de umidade (Figura 22), o valor de atividade de água do miolo dos pães com AR decresceu em função do tempo de armazenamento para todas as amostras, principalmente no primeiro dia. Nos últimos dias de estocagem o pão controle apresentou maior atividade de água que os pães com AR. De acordo com Cauvain e Young (2009), a quantidade de água ligada aumenta ligeiramente com o envelhecimento do pão, enquanto a quantidade de água livre diminui. O amido muda do estado amorfo para o estado cristalino mais estável, enquanto as moléculas de água ficam imobilizadas conforme são incorporadas na estrutura cristalina, resultando numa diminuição da mobilidade da água.

No entanto, para a crosta, houve uma leve redução na atividade de água no primeiro dia seguido de um leve aumento nos dias subsequentes para o pão controle. Para as amostras com AR, os valores de atividade de água da crosta não tiveram um padrão definido nos primeiros dias. Após o 5º dia os valores variaram em uma pequena faixa tendendo a estabilização. No entanto, para a crosta, houve uma leve redução na atividade de água no primeiro dia seguido de um leve aumento nos dias subsequentes para o pão controle.

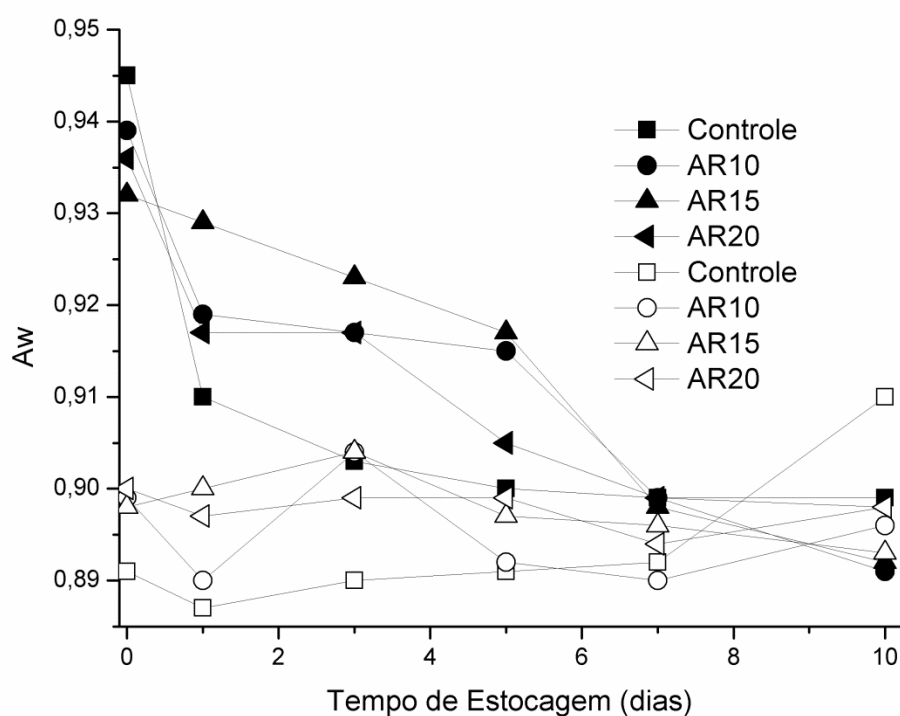


Figura 23: Atividade de água do miolo (símbolos fechados) e da crosta (símbolos abertos) dos pães sem e com AR durante armazenamento.

5.3.4.4 Cor do miolo e crosta do pão

Segundo a Legislação Brasileira, o miolo deve apresentar cor branco-creme uniforme, ser poroso, leve, homogêneo e elástico, não deve aderir aos dedos quando comprimido, nem apresentar aglomerações duras, pontos negros, pardos ou avermelhados. O pão de boa qualidade apresenta miolo consistente, cavidades irregulares, textura macia e aveludada, sedosa e elástica (BRASIL, 2000). A cor do miolo dos pães controle e com AR estão apresentados na Tabela 25.

Os valores de L^* , a^* e b^* do pão controle estão de acordo com os valores encontrados por Ormenese (2010) e Esteller e Lannes (2005). O miolo do pão controle apresentou cor característica de pão, com tom creme e amarelado. A incorporação do AR, independente da concentração, afetou levemente os valores de L^* e b^* do miolo dos pães frescos e armazenados durante 10 dias, quando comparados ao controle, não alterando visualmente a coloração do miolo.

A L^* dos miolos no dia 0 variou de 72,11 a 76,16, sendo que este parâmetro foi influenciado principalmente pelas propriedades reológicas da massa. A L^* teve uma correlação positiva com o tempo de desenvolvimento ($r = 0,87$, $p > 0,05$) e a estabilidade ($r =$

0,96, $p > 0,05$), sugerindo que as amostras de maior força de glúten resultaram em pães com miolo mais claros, pois pães com maior volume têm as células do miolo mais uniformes e, portanto que refletem melhor a luz proporcionando um maior L^* .

Tabela 25: Parâmetros de cor instrumental do miolo dos pães sem e com AR.

Estocagem (dias)	<i>L* miolo</i>			
	Controle	10%AR	15% AR	20 % AR
0	76,16 ± 1,05 ^{NSa}	74,23 ± 0,89 ^{NSab}	72,11 ± 2,05 ^{NSb}	74,09 ± 0,17 ^{NSab}
1	74,78 ± 1,93 ^{NSns}	73,75 ± 1,53 ^{NSns}	72,49 ± 0,58 ^{NSns}	73,44 ± 1,10 ^{NSns}
3	75,61 ± 1,16 ^{NSns}	73,78 ± 0,97 ^{NSns}	74,18 ± 1,02 ^{NSns}	73,50 ± 1,20 ^{NSns}
5	76,09 ± 0,15 ^{NSa}	74,82 ± 0,34 ^{NSab}	73,75 ± 0,60 ^{NSb}	74,47 ± 0,90 ^{NSb}
7	75,88 ± 0,21 ^{NSa}	74,31 ± 0,68 ^{NSab}	73,84 ± 0,69 ^{NSb}	74,62 ± 0,83 ^{NSab}
10	75,36 ± 0,55 ^{NSns}	74,08 ± 0,69 ^{NSns}	74,13 ± 1,09 ^{NSns}	74,81 ± 0,25 ^{NSns}
<i>a* miolo</i>				
0	0,91 ± 0,03 ^{Ba}	0,38 ± 0,01 ^{Ec}	0,34 ± 0,01 ^{Dc}	0,76 ± 0,02 ^{Cb}
1	0,27 ± 0,00 ^{Ec}	0,37 ± 0,01 ^{Eb}	0,12 ± 0,01 ^{Ed}	0,62 ± 0,02 ^{Da}
3	0,56 ± 0,01 ^{Dc}	0,77 ± 0,04 ^{Db}	0,38 ± 0,01 ^{Dd}	0,97 ± 0,03 ^{Ba}
5	0,73 ± 0,03 ^{Cc}	0,87 ± 0,00 ^{Cb}	0,55 ± 0,02 ^{Cd}	0,94 ± 0,01 ^{Ba}
7	1,08 ± 0,03 ^{Aa}	0,95 ± 0,01 ^{Bb}	0,85 ± 0,03 ^{Bc}	1,05 ± 0,05 ^{Aa}
10	0,92 ± 0,02 ^{Bb}	1,07 ± 0,05 ^{Aa}	0,92 ± 0,01 ^{Ab}	0,83 ± 0,02 ^{Cc}
<i>b* miolo</i>				
0	18,78 ± 0,67 ^{ABCab}	18,41 ± 0,55 ^{Bab}	17,73 ± 0,72 ^{Bb}	19,43 ± 0,41 ^{NSa}
1	17,99 ± 0,58 ^{Cb}	18,64 ± 0,54 ^{Bab}	17,97 ± 0,42 ^{Bb}	19,21 ± 0,29 ^{NSa}
3	18,13 ± 0,60 ^{BCns}	19,18 ± 0,31 ^{ABns}	17,92 ± 0,46 ^{Bns}	18,93 ± 0,53 ^{NSns}
5	18,65 ± 0,19 ^{ABCns}	19,56 ± 0,24 ^{ABns}	19,46 ± 0,88 ^{ABns}	19,23 ± 0,45 ^{NSns}
7	19,55 ± 0,56 ^{Ans}	19,41 ± 0,35 ^{ABns}	19,24 ± 0,58 ^{ABns}	19,64 ± 0,54 ^{NSns}
10	19,51 ± 0,29 ^{ABns}	20,11 ± 0,90 ^{Ans}	19,99 ± 0,65 ^{Ans}	19,30 ± 0,39 ^{NSns}

Média de seis replicatas seguido do desvio padrão. Letras diferentes em minúsculo na mesma linha e maiúsculo na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: não significativo.

A presença de 10 e 15% % de AR causou redução significativa no valor de a^* (intensidade de vermelho) do miolo durante todo o período de armazenamento. Segundo Cauvain e Young (2009) a cor do miolo do pão é afetada pela cor dos ingredientes, isso porque o miolo não está tão susceptível a mudança de cor quanto à crosta quando submetido a altas temperaturas. O amido resistente possui cor branca, contribuindo para os menores valores de a^* quando 10 e 15% de AR foram incorporados nos pães.

A avaliação da cor da crosta é um parâmetro crítico em produtos forneados. Pães com crosta muito clara ou muito escura estão associados a falhas no processamento (ESTELLER e

LANNES, 2005). A cor da crosta dos pães controle e com AR estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26: Parâmetros de cor instrumental da crosta dos pães sem e com AR.

<i>Estocagem (dias)</i>	<i>L* crosta</i>			
	<i>Controle</i>	<i>10% AR</i>	<i>15% AR</i>	<i>20 % AR</i>
0	58,85 ± 2,19 ^{NSc}	62,68 ± 1,67 ^{Bbc}	63,98 ± 1,41 ^{Bab}	67,46 ± 0,97 ^{NSa}
1	56,94 ± 2,06 ^{NSb}	69,67 ± 1,86 ^{Aa}	68,78 ± 2,32 ^{ABa}	67,12 ± 0,69 ^{NSa}
3	57,31 ± 1,42 ^{NSb}	68,63 ± 2,36 ^{Aa}	70,39 ± 2,99 ^{Aa}	68,98 ± 0,37 ^{NSa}
5	58,79 ± 1,77 ^{NSb}	67,14 ± 1,46 ^{ABa}	68,28 ± 1,04 ^{ABa}	70,70 ± 1,80 ^{NSa}
7	56,66 ± 2,05 ^{NSb}	67,38 ± 1,26 ^{ABa}	67,92 ± 1,52 ^{ABa}	69,46 ± 0,26 ^{NSa}
10	57,95 ± 1,26 ^{NSb}	67,00 ± 2,23 ^{ABa}	66,22 ± 1,25 ^{ABa}	68,72 ± 2,95 ^{NSa}
<i>a* crosta</i>				
0	14,41 ± 0,24 ^{NSa}	12,31 ± 0,35 ^{Ab}	11,44 ± 0,32 ^{Ab}	9,34 ± 0,46 ^{Ac}
1	13,95 ± 1,07 ^{NSa}	9,09 ± 0,09 ^{CDb}	7,42 ± 0,26 ^{Ec}	8,10 ± 0,10 ^{Bbc}
3	14,48 ± 0,69 ^{NSa}	8,55 ± 0,36 ^{Db}	7,69 ± 0,22 ^{DEbc}	7,17 ± 0,20 ^{Cc}
5	13,73 ± 0,45 ^{NSa}	9,79 ± 0,18 ^{Bb}	8,81 ± 0,16 ^{Cc}	7,48 ± 0,21 ^{BCd}
7	14,58 ± 1,16 ^{NSa}	9,58 ± 0,20 ^{BCb}	8,19 ± 0,22 ^{CDbc}	7,57 ± 0,0 ^{6BCc}
10	14,21 ± 1,08 ^{NSa}	9,29 ± 0,05 ^{BCb}	9,52 ± 0,01 ^{Bb}	7,49 ± 0,02 ^{BCc}
<i>b* crosta</i>				
0	36,03 ± 1,09 ^{NSa}	35,21 ± 0,51 ^{ABa}	35,00 ± 0,08 ^{ABa}	32,39 ± 0,79 ^{NSb}
1	33,93 ± 0,97 ^{NSa}	34,56 ± 0,41 ^{Ba}	34,92 ± 0,27 ^{ABa}	32,73 ± 0,82 ^{NSb}
3	34,89 ± 0,42 ^{NSa}	34,35 ± 0,42 ^{BCa}	34,55 ± 0,41 ^{ABa}	31,74 ± 0,97 ^{NSb}
5	33,68 ± 0,59 ^{NSa}	33,27 ± 0,58 ^{Ca}	34,07 ± 0,55 ^{Ba}	31,26 ± 0,77 ^{NSb}
7	34,86 ± 1,20 ^{NSns}	34,56 ± 0,41 ^{Bns}	35,44 ± 0,75 ^{Ans}	33,28 ± 1,04 ^{NSns}
10	35,91 ± 0,75 ^{NSa}	36,17 ± 0,43 ^{Aa}	35,75 ± 0,32 ^{Aa}	33,54 ± 0,73 ^{NSb}

Média de seis replicatas seguido do desvio padrão. Letras diferentes em minúsculo na mesma linha e maiúsculo na mesma coluna indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: não significativo.

Os pães com AR apresentaram crostas mais claras, com valores de L* variando de 62,68 a 70,70, enquanto as crostas do pão controle mostraram luminosidade entre 56,66 a 58,85. A α -amilase é uma das responsáveis pela cor da crosta dos pães, devido à degradação do amido em dextrinas e maltose (COSTA et al. 2008). Quanto maior a substituição de AR mais clara foi a cor da crosta ($> L^*$). Do mesmo modo, quanto maior a concentração de AR menor a intensidade vermelha na crosta ($< a^*$). Esses resultados estão relacionados à menor quantidade de amido proveniente da farinha na mistura farinha-AR. Durante o início do forneamento, com a gelatinização e degradação do amido pelas amilases, os açúcares redutores estão disponíveis para a reação e *Maillard*. Com a substituição parcial da farinha

pelo AR, que se comporta como uma fibra inerte, menor quantidade de açúcares redutores estão presentes reduzindo a coloração da crosta.

Os valores b^* (amarelo) da crosta dos pães com 10 e 15% de AR não diferiram significativamente daqueles do pão controle e foram menores para os pães com 20% de AR. Esses resultados sugerem que a substituição de até 15% de AR, propiciaram pães com coloração adequada, quando comparado ao controle.

5.3.4.5 Propriedades térmicas do miolo dos pães com e sem AR

Após a gelatinização, as moléculas de amido se reassociam, esse fenômeno é denominado de retrogradação. A recristalização da amilopectina ocorre durante o armazenamento e acarreta na reorganização das moléculas de amido (KARIM NORZIAH e SEOW, 2000).

O comportamento do ΔH dos pães elaborados com a massa controle e com a adição de AR foram semelhantes. O ΔH aumentou durante o armazenamento para todas as amostras analisadas (Figura 24) devido à retrogradação das moléculas de amilopectina durante o armazenamento dos pães. Houve um aumento mais pronunciado da entalpia nos três primeiros dias de estocagem e um aumento leve no período intermediário. Após o 7º dia de armazenamento, a entalpia do pão controle tendeu à estabilização, enquanto que nos pães com AR essa estabilização não ocorreu, sugerindo uma possível fração de amido a se retrogradar após o 10º dia. No entanto, os pães com AR apresentaram ΔH menor que o do pão controle durante todo o período de armazenamento, e que praticamente não diferiu com o aumento da concentração de AR, podendo indicar que, independente da concentração utilizada, o AR pode conferir menor retrogradação que o controle.

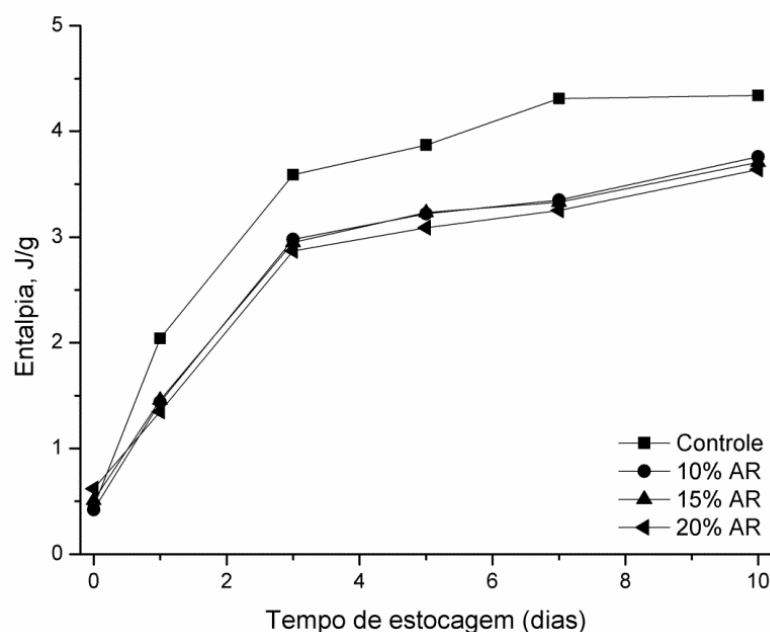


Figura 24: Entalpia de retrogradação da amilopectina no miolo dos pães com e sem AR durante armazenamento

Para entender a cinética de retrogradação do amido durante o armazenamento dos pães controle e com AR, a equação de Avrami foi aplicada (equação 4). Como discutido anteriormente, altos valores de n e baixos valores de k são mais comumente encontrados, porém, baixos valores de k , n , ΔH_0 e ΔH_∞ são os responsáveis por representar lenta cinética de retrogradação (CURTI et al, 2014). O expoente de Avrami (n) e a constante de velocidade k estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27: Cinética de retrogradação da amilopectina durante estocagem de pães com e sem AR.

%AR	Parâmetros de Avrami				
	ΔH_0	ΔH_∞	n	k (d ⁻ⁿ)	R^2
0	0,45	4,34	0,96	0,53	0,996
10	0,42	3,76	0,97	0,42	0,984
15	0,51	3,71	1,01	0,39	0,985
20	0,62	3,64	1,07	0,33	0,978

ΔH_0 = entalpia de retrogradação no tempo 0; ΔH_t = entalpia de retrogradação no tempo “t”; ΔH_∞ = entalpia de retrogradação no tempo ∞ ; k = taxa constante; n = Expoente de Avrami; R^2 = Ajuste do coeficiente de determinação.

O expoente de Avrami variou em uma pequena faixa (0,96-1,07) sugerindo que o processo de cristalização do amido presente no miolo do pão controle e aqueles com AR foi

semelhante. O pão controle apresentou maior taxa de retrogradação (k) que também pode ser observada na Figura 24.

O aumento de n indica que uma maior quantidade de cristais está presente inicialmente na amostra (CURTI et al., 2014). Como mostra a Tabela 27 o expoente n aumentou com o aumento do teor de AR, fato esperado, pois o amido resistente não se gelatiniza nas temperaturas usadas no forneamento, mantendo-se inerte no pão. O aumento do n com aumento do teor de AR pode inicialmente indicar uma rápida retrogradação, mas a constante de velocidade k nos mostra que os pães com AR têm lenta taxa de retrogradação, isso porque o AR no pão não está gelatinizado e, portanto, não pode retrogradar durante o armazenamento, reduzindo assim a retrogradação. Os resultados indicaram que o AR interferiu positivamente na taxa de retrogradação da amilopectina em função da menor quantidade de amido gelatinizado nas misturas farinha-AR e, portanto, menor quantidade de amilopectina a se recrystalizar durante a estocagem do pão. Resultados semelhantes foram encontrados por Sanz-Penella et al. (2010) que encontraram menores constantes de velocidade (k) e maior número de Avrami (n) com o aumento do teor de AR nos pães.

5.3.4.6 Padrão de raios-X e cristalinidade relativa do miolo dos pães com e sem AR

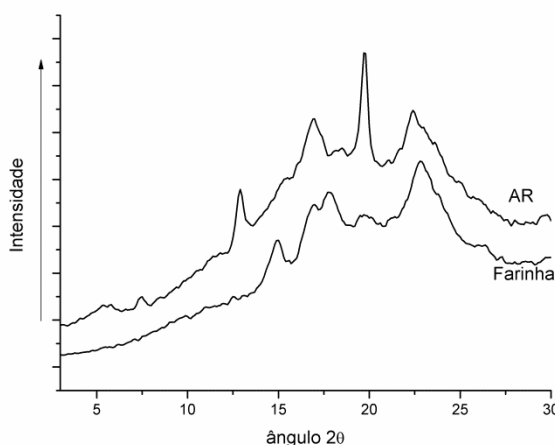


Figura 25: Padrão de difração de raios-X do amido resistente (AR) e da farinha de trigo

A farinha de trigo apresentou um padrão de difração de raios-X tipo A como já esperado para amidos de cereais, enquanto o AR apresentou padrão cristalino tipo B (Figura 25) com 37% de cristalinidade, padrão típico do amido de milho com alto teor de amilose e de amidos retrogradados. O difractograma do AR também exibiu um forte pico a 20° em 2θ, correspondente ao polimorfo tipo V. Amilose-V é um termo genérico usado para as moléculas

de amilose obtidas como hélices simples co-cristalizadas com compostos como iodo, álcoois ou lipídeos (BULÉON et al., 1998).

O difractograma do miolo dos pães frescos controle e com AR (Figura 26 I, II, III, IV a) apresentaram apenas um pico a 20° em 2θ , característico do complexo amilose-lipídeo formado entre a farinha e lipídeos endógenos e exógenos acrescentados à formulação durante a gelatinização do amido no forneamento. Apesar do amido resistente não ter se gelatinizado durante forneamento, não foram observados nos pães frescos com AR os picos referentes à sua presença (padrão tipo B), provavelmente devido à pequena concentração na mistura. No entanto, após 10 dias de armazenamento esses picos ficaram visíveis em todas as amostras controle e com AR devido à retrogradação da amilopectina, porém muito mais resolvidos quanto maior a concentração de AR.

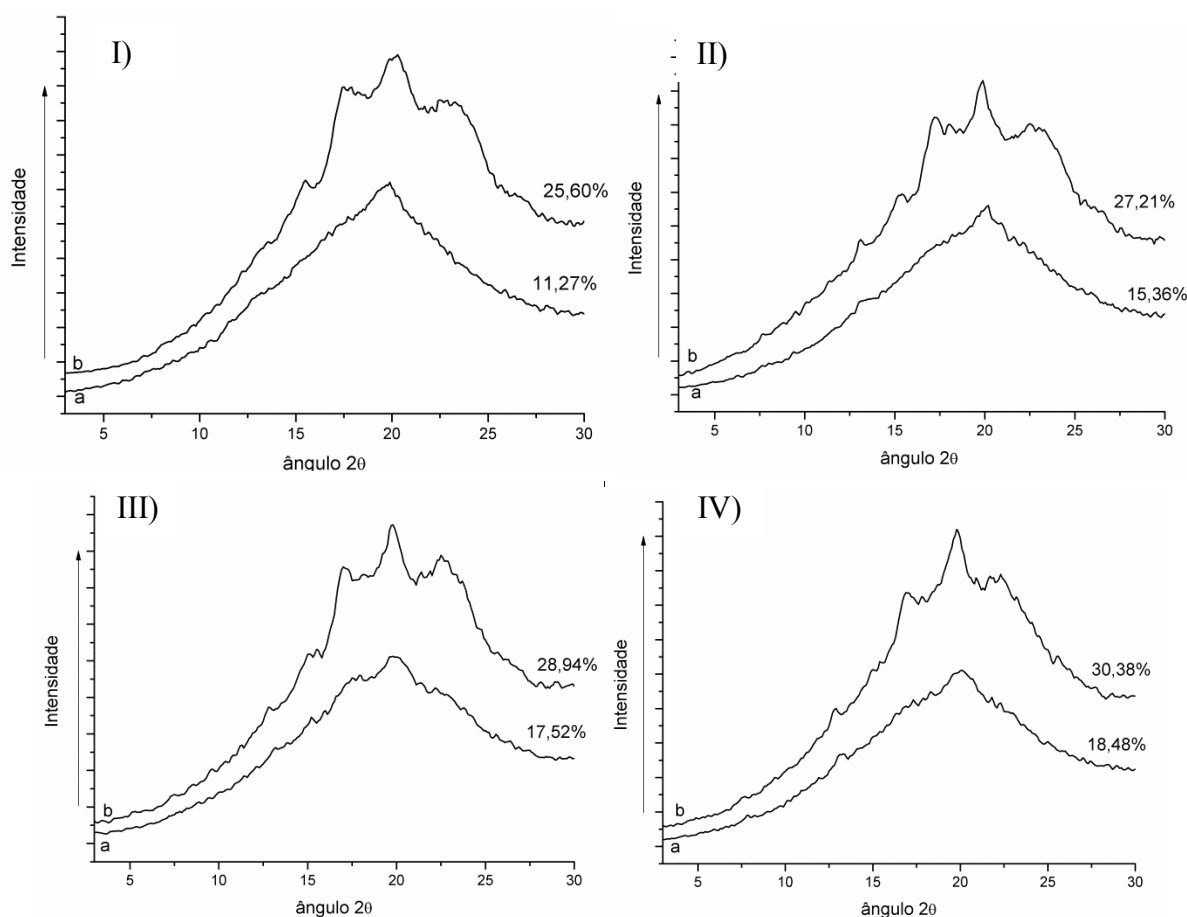


Figura 28: Padrão de difração de raios-X e cristalinidade relativa do miolo dos pães controle e com AR. I) Controle; II) 10% AR; III) 15% AR; IV) 20% AR. a: pães frescos; b: 10 dias de armazenamento.

A cristalinidade relativa do amido no miolo dos pães com AR foi significativamente maior que aquela no pão controle tanto nos pães frescos quanto naqueles armazenados por 10 dias. Isso pode ser explicado pelo fato do AR não ter se gelatinizado durante o processamento do pão, assim a cristalinidade apresentada nas amostras com AR se deve não só ao amido retrogradado, mas também aos grânulos de amido resistente presente. Houve aumento gradual da cristalinidade com o aumento do teor de AR nas amostras, independente da concentração. Esses dados correlacionam positivamente ($r = 0,95$, $p > 0,05$) com o número de Avrami (Tabela 27) que mostrou aumento no valor n quanto maior a concentração de AR. Apesar da maior cristalinidade relativa dos pães com AR a taxa de retrogração k ($r = -0,98$, $p > 0,05$) foi menor quanto maior a concentração e AR como observado na Tabela 27.

5.3.4.7 Firmeza do miolo do pão

A firmeza do miolo dos pães controle e com AR está apresentada na Figura 29. De acordo com Eliasson (1993), a firmeza do miolo aumenta ao longo do tempo, sendo que as alterações mais pronunciadas ocorrem durante o primeiro dia de estocagem. A firmeza do miolo aumentou gradualmente para todas as amostras, controle e com AR durante o armazenamento.

A firmeza do miolo do pão controle esteve muito próxima àquelas dos pães com AR até o terceiro dia, com exceção da amostra com 20% de AR que mostrou maior firmeza que o controle durante todo o período de armazenamento. Após o terceiro dia, as amostras com 10 e 15% de AR mostraram firmeza menor que a do pão controle sendo a menor firmeza observada no pão com 15% de AR. A firmeza está intimamente relacionada com o volume do pão (ELIASSON, 1993). Depois do pão controle, a amostra com 15% de AR apresentou os maiores volume da massa e volume específico do pão. Além disso, os pães com AR apresentaram maior umidade do miolo e menor cinética de retrogradação durante armazenamento, contribuindo para a menor firmeza dos pães como pode ser observado para as concentrações de 10 e 15% de AR. Com 20% de AR e, portanto maior diluição da farinha de trigo houve um maior enfraquecimento da massa que dificultou a expansão e retenção dos gases, fazendo com que o pão apresentasse menor volume e maior firmeza, mesmo apresentando a menor taxa de retrogradação.

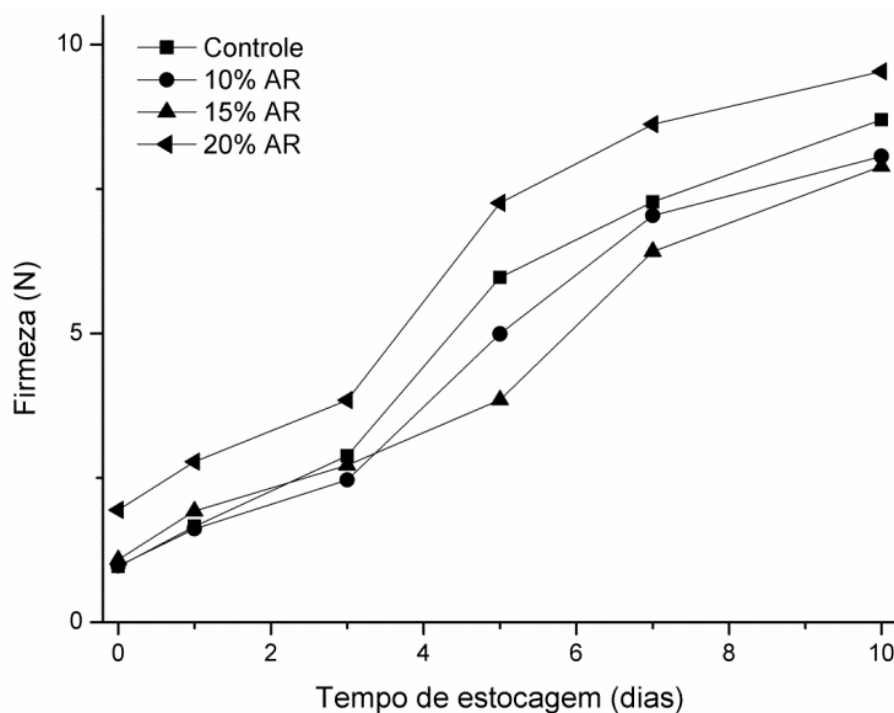


Figura 29: Firmeza (N) dos pães sem e com AR durante o período de armazenamento.

5.3.4.8 Teor de AR nos pães

O laudo técnico do Hi-Maize 260[®] disponibilizado pela Ingredion, o AR em estudo apresenta 54% de resistência. O teor de amido resistente na amostra em estudo obtido a partir do método de Goñi (1998) foi de 51,5%, próximo ao apresentado pela empresa.

O teor amido resistente das amostras de pães com e sem AR estão apresentados na tabela 28.

Tabela 28: Teor de amido resistente na amostra de AR e nos pães sem e com AR

Amostra	Teor g/100g*
AR	51,53 ± 1,18
Controle	1,21 ± 0,04 ^d
10% AR	5,08 ± 0,11 ^c
15% AR	7,15 ± 0,34 ^b
20% AR	10,18 ± 0,22 ^a

Média de duplicatas seguida de desvio padrão. Letras diferentes indicam diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). * Base seca

O pão controle apresentou teor de amido resistente de 1,21 g/100g, concordando com Goñi (1998) que observou que pães brancos podem apresentar teor de amido resistente na

faixa de 1-2,5%, o qual é formado durante o processamento. Os pães com 15 e 20% AR tiveram teores de AR superiores a 6 g/100g, o que os classifica como produtos com alto conteúdo de fibras, enquanto o pão com 10% de AR pode ser classificado como produto fonte de fibras (BRASIL, 2012).

6. CONCLUSÃO

Este estudo mostrou que a IMP provocou aumento na estabilidade e elasticidade da farinha, aumentando aparentemente sua força, porém as análises alveográficas, microscópicas e reológicas mostraram que a IMP enfraqueceu a rede do glúten, conferindo menor capacidade de retenção de gás à massa e com isso resultou em pães com menor volume específico e maior firmeza. A possível hidrólise da IMP durante a fermentação com a consequente degradação no forneamento pode ter potencializado a Reação de Maillard conferindo a crosta dos pães uma cor mais escura que o controle. Durante a estocagem a IMP levou a uma maior cinética de retrogradação do amido (n e k da equação de Avrami) e maior índice de cristalinidade relativa. Ainda assim, com uma farinha forte concentrações de até 7,5 % de IMP propiciaram pães frescos de qualidade muito boa com volume, firmeza e cor próxima àqueles do pão controle, além de serem considerados produtos fonte de fibra por apresentarem quantidades superiores a 3g/100g.

A IMP, não demonstrou efeito antienvhecimento, sendo a sua incorporação em pães mais indicada pelos seus benefícios funcionais.

A substituição parcial da farinha pelo AR enfraqueceu a massas e comprometeu a rede do glúten, porém, com até 15% de AR substituindo uma farinha forte, foi possível produzir pães com qualidades tecnológicas muito próximas aos dos pães controle. Isso pode ser explicado pela qualidade do glúten presente na farinha usada na elaboração dos pães terem disso capaz de suportar os efeitos deletérios do AR. A utilização de uma farinha forte possibilita a incorporação de até 15% de AR na formulação sem alterar as características de qualidade do pão e contribuindo significativamente para a redução da taxa de envelhecimento, além dos pães serem classificados como produtos com “*Alto conteúdo de fibras*” pela legislação vigente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AACC, (American association of cereal chemistry). **Approved methods of the AACC**. 10th. ed. Washington: St. Paul, Minn.: The Committee, 2000.

AACC, (American association of cereal chemistry). AACC report: The definition of dietary fiber. **Cereal Foods World**, v 46, p. 112-129, 2001

ABIMA, Associação Brasileira das Indústrias de Massas Alimentícias e Pão e Bolo Industrializados. **Mercado de Pães Industrializados fatura R\$ 4 bilhões**. Disponível em: <http://www.abima.com.br/noticias_setor_detalhe.php?cod=1244>. Acesso em 25 Maio 2014.

AGUIRRE, J. F.; OSELLA, C. A.; CARRARA, C. R.; SANCHEZ, H. D.; BUERA, M. P. Effect of storage temperature on starch retrogradation of bread staling. **Starch/Stärke**, v.63, p.587-593, 2011.

ALBANO, K. M.; FRANCO, C. M. L.; TELIS, V. R. N. Rheological behavior of Peruvian carrot starch gels as affected by temperature and concentration. **Food Hydrocolloids**, v. 40 p. 30-43, 2014.

ALMEIDA, E. L. **Estudo de pão francês pré-assado congelado elaborado com farinha de trigo integral: influência da formulação, processo e estocagem congelada**. 274 f. 2011. Tese. Doutorado em Tecnologia de alimentos – Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, 2011.

ALMEIDA, E. L.; CHANG, Y. K.; STEEL, C. J. Dietary fibre sources in bread: Influence on technological quality. **LWT - Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 445-453, 2013.

AOAC - Association of Official Analytical Chemists **Official methods of analysis of Association of Official Analytical Chemists**. 16^a ed., 3. rev. Gaithersburg: AOAC International, 1997.

ARMERO, E.; COLLAR, C. Crumb firming kinetics of wheats bread with anti-staling additives. **Journal of Cereal Science**, v. 28, p. 165-174, 1998.

ASP, N. G. Preface: Resistant Starch. **European Journal of Clinical Nutrition**, v. 46, n.2, p. S1, 1992.

ATWELL, W. A., **Wheat Flour**. St. Paul: Eagan Press, 2001. 134p.

BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F. **Química do processamento de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 2001. 143p.

BOHM, A.; KAISER, I.; TREBSTEIN, A.; HENLE, T. Heat-induced degradation of inulin. **European Food Research and Technology**, v. 220, n. 5–6, p. 466–471, 2005

BORGHT, A. V. D.; GOESAERT, H. VERAVERBEKE, W. S.; DELCOUR, J. A. Fractionation of wheat and wheat flour into starch and gluten: overview of the main processes and the factors involved. **Journal of food Science**, v. 41, p. 221-237, 2005.

BRASIL. Resolução RDC ANVISA/MS nº90, de 18 de outubro de 2000. Aprova o **Regulamento Técnico para Fixação de Identidade e Qualidade de Pão**. Disponível em <www.anvisa.gov.br/legis/index_ato.htm>. Acesso em: 15 Nov. 2014.

BRASIL. Instrução Normativa nº 8, de 2 de Junho de 2005. Aprova o regulamento técnico de identidade e qualidade da farinha de trigo. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 de jun. de 2005. Seção 1.

BRASIL. Instrução Normativa MAPA nº 38, de 30 de novembro de 2010. Regulamento técnico do trigo. **Diário Oficial União**, Brasília, DF, n. 29, p. 2, 1 dez. 2010. Seção 1.

BRASIL, Resolução RDC ANVISA/MS nº54, de 12 de novembro de 2012. Regulamento Técnico sobre Informação Nutricional Complementar. **Diário Oficial União**, Brasília, DF, 12 de nov. de 2012. Seção 1.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária**. Alimentos Com Alegações de Propriedades Funcionais e ou de Saúde, 2014. Disponível em: <<http://portal.anvisa.gov.br/wps/content/Anvisa+Portal/Anvisa/Inicio/Alimentos/Assuntos+de+Interesse/Alimentos+Com+Alegacoes+de+Propriedades+Funcionais+e+ou+de+Saude/Alegacoes+de+propriedade+funcional+Aprovadas>>. Acesso em 10 Maio, 2014.

BULÉON, A.; COLONNA, P.; PLANCHOT, V.; BALL, S. Starch granules: structure and biosynthesis – Mini review. **Internacional Journal of Biological Macromolecules**, v. 23, p. 85-112, 1998.

CARVALHO JÚNIOR, Divanildo. **Controle de qualidade de trigo e derivados e tratamento e tipificação de farinhas**. Curitiba: Núcleo de Desenvolvimento e Tecnologia - GRANOTEC DO BRASIL, 1999. 97 p.

CAUVAIN, S. P.; YOUNG, L. S. **Tecnologia de Panificação**. 2 ed. Barueri, SP: Manole, 2009. 440 p.

CHUNG, O. K; OHM, J.; RAM, M.; PARK, S.; HOWITT, C. Wheat lipids. In: KHAN, K.SHEWRY, P. R. (Eds.), Wheat: Chemistry and technology, 4º ed. **AACC International**, St. MN, USA, p.363-393, 2009.

COSTA, M. G; SILVA, E. L.; STAMFORD, T. L. M.; ANDRADE, S. A. C. Qualidade tecnológica de grãos e farinhas de trigo nacionais e importados. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 1, p. 220-225, 2008.

CUBBADA, R. Evaluation of durum wheat, semolina and pasta in Europe. In: FABRIANI, G.; LINTAS, C. DURUM. **Chemistry and Technology**. American Assoc. of Cereal Chemists, Inc., St. Paul Minn., USA. 1988.

CURTI, H.; CARINI, E.; TRIBUZIO, G.; VITTADINI, E.; Bread staling: Effect of gluten on physico-chemical properties and molecular mobility. **LWT - Food Science and Technology**, p. 1-8, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.057>>

DELZENNE, N. M.; DAUBIOUL, C.; NEYRINCK, M.; LASA, M.; TAPER, H. S. Inulin and oligofructose modulate lipid metabolism in animals: review of biochemical events and future prospects. **British Journal of Nutrition**, v.87, n. 2, p.255–259, 2002.

DeVRIES, J. W. On defining dietary fibre. **Proceedings of the Nutrition Society**, v. 46, p. 112-29, 2003.

DOMÍNGUEZ, G. C.; GUEVARA, M. N.; REBOLLO, R. F.; ERRASQUÍN, R. A.; ESCOBEDO, R. M. Structural and farinographic changes during mixing of a yeast sweet dough. **Nahrung Food**, v. 47, n. 5, p. 312-319, 2003.

EL-DASH, A. A. Standardized mixing and fermentation procedure for experimental baking test. **Cereal Chemistry**, v. 55. n. 4, p. 336-446, 1978.

EL-DASH, A. A.; CAMARGO, C. O.; DIAZ, N. M. **Fundamentos da tecnologia de panificação**. São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio e Tecnologia, 1990. 345 p.

EL-DASH, A.; CAMPOS, J.E.; GERMANI, R. **Tecnologia de farinhas mistas**. Uso de Farinha Mista de Trigo e Sorgo na Produção de Pães. v.4. Brasília: Embrapa 1994.

ELIASSON, A. C. **Cereals in breadmaking: a molecular colloidal approach**. New York : Marcel Dekker, 1993. 376 p.

ELIASSON, A.C. **Starch in food – Structure, function and applications**. New York: Boca Raton, CRC, 2004. 605p.

ESTELLER, M. S.; LANNES, S. C. Parâmetros complementares para fixação de identidade e qualidade de produtos panificados. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 4, p. 802-806, 2005.

ESTELLER, M. S.; LANNES, S. C. Production and characterization of sponge-dough bread using scalded rye. **Journal of Texture Studies**. v. 39, p. 56–67, 2008.

FINNIE, S. M.; JEANNOTTE, R.; FAUBION, J. M. Quantitative Characterization of Polar Lipids from Wheat Whole Meal, Flour, and Starch. **Cereal Chemistry**, v. 86, n. 6, p. 637–645, 2009.

FOIS, S.; SANNA, M.; STARA, G.; ROGGIO, T.; CATZEDDU, P. Rheological Properties and baking quality of commercial durum wheat meals used to make flat crispy bread. **European Food Research Technology**, n. 232, p. 713–722, 2011.

FRANCO, C. M. L.; et al. Propriedades do Amido, In: **Culturas de Tuberosas Amiláceas Latino Americanas, Propriedades Gerais do Amido**. Campinas: Fundação Cargill, v.1. 2001.

FUENTES-ZARAGOSA, E.; SÁNCHEZ-ZAPATA, E.; SENDRA, E.; SAYAS, E.; NAVARRO, C.; FERNÁNDEZ-LOPEZ, J.; PÉREZ-ALVAREZ, J. A. Resistant starch as prebiotic: A review. **Starch-Journal**, v. 62, n. 1, p. 406-415, 2011.

FU, Lei.; TIAN, J.C.; SUN, C.; LI, C. RVA and Farinograph Properties Study on Blends of Resistant Starch and Wheat Flour. **Agricultural Sciences in China**, v. 7, n. 7, p. 812-822, 2008.

GIBSON, G. R.; ROBERFROID, M. Dietary modulation of the human colonic microbiota: Introduction the concept of prebiotics. **American Journal of Nutrition**, v. 125, n. 6, p. 1401–1412, 1995.

GUARIENTI, E. M. **Qualidade industrial do trigo**. Embrapa. 2ª edição, Passo Fundo – RS, 1996.

GLIBOWSKI, P.; BUKOWSKA, A. The effect of pH, temperature and heating time on inulin chemical stability. **Acta Scientiarum Polonorum – Technologia Alimentaria**, v. 10 n. 2, p. 189–196, 2011.

GOESAERT, H.; BRIJS, K.; VERAVERBEKE, W.S.; COURTIN, C.M.; GEBRUERS, K.; DELCOUR, J.A. Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. **Trends in Food Science and Technology**, v.16, p.12-30, 2005.

GOÑI, I.; GARCIA-DIZ, L.; MAÑAS, E.; SAURA-CALIXTO, F. Analysis of resistant starch: a method for foods and food products. **Food chemistry**, v. 56, n. 4, p. 445-449, Aug. 1996.

GRAS, P.W.; CARPENTER, H.C.; ANDERSSSEN, R.S. Modelling the developmental rheology of wheat-flour dough using extension tests. **Journal of Cereal Science**, v.31, p. 1-13, 2000.

GRAY, J.A.; BEMILLER, J.N. Bread staling: Molecular basis and control. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 2, n. 1, 2003.

GUTKOSKI, L. C. **Controle de qualidade de grãos e farinhas de cereais**. IV Simpósio de Nutrição, Ciência e Tecnologia de Alimentos, Passo Fundo, 2009.

HAGER, A. S.; RYAN, A.M.; SHWAB, C.; GANGLE, M. G.; O'DOHERTY, J. V.; ARENDT, E. E. Influence of the soluble fibres inulin and oat β -glucan on quality of dough and bread. **Eur. Food Res Technol**, v. 232, n. 1, p. 405–413, 2011.

HOWLETT, J.F.; BETTERIDGE, V. A.; CHAMP, M.; CRAIG, S. A. S.; MEHEUST, A.; JONES, J. M. The definition of dietary fiber – discussions at the Ninth Vahouny Fiber Symposium: building scientific agreement. **Food. Nutrients Review.**, v. 54, p. 5750, 2010.

HUEBNER, J.; WEHLING, R. L.; PARKHURST, A.; HUTKINS, R. W. Effect of processing conditions on the prebiotic activity of commercial prebiotics. **International Dairy Journal**, v. 18, n. 3, p. 287–293, 2008.

HUG-LTEN, S. **Staling of Bread and Bread Model Systems - Role of Starch and Amylases**. 146p. 2000. Thesis. Swiss Federal Institute Of Technology. Zurich, 2000.

ITURRIAGA, L. B.; LOPEZ DE MISHIMA, B.; AÑON, M. C. A study of the retrogradation process in five argentine rice starches. **LWT e Food Science and Technology**, v. 43, p. 670-674, 2010.

INGREDION. **Boletim técnico de serviço Hi-Maize® 260**, 1p. Laudo de análise referente aos resultados físico-químicos do produto Hi- Maize® 260. National Starch. 2014. Disponível em: <sp.ingredion.us/_layouts/ns_prod/DBDocuments.aspx?DocumentId>. Acesso em: 10 jul. 2014.

JANSSEN, A. M.; VAN VLIET, T.; VEREIJCKENS, J. M. Fundamental and Empirical Rheological Behaviour of Wheat Flour Doughs and Comparison with Bread Making Performance. **Journal of the Cereal Science**, v. 23, p. 43-54, 1996.

JUSZCZAK, L.; WITCZAK, T.; ZIOBRO, R.; KORUS, J.; CIEŚLIK, E.; WITCZAK, M. Effect of inulin on rheological and thermal properties of gluten-free dough. **Carbohydrate Polymers**, v. 90, p. 353-360, 2012.

KARIM, A.; NORZIAH, M. H.; SEOW, C. C. Methods for the study of starch retrogradation. **Food Chemistry**, v. 71, p. 9-36, 2000.

KAROLINI-SKARADZINSKA, Z.; BIHUNIAK, P.; PIOTROWSKA, E.; WDOWIK, L. Properties of dough and qualitative characteristics of wheat bread with addition of inulin. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, v. 57 n.4B, p. 267–270, 2007.

KAWAI, K.; TAKATO, S.; SASAKI, T., KAJIWARA, K. Complex formation, thermal properties, and in-vitro digestibility of gelatinized potato starch-fatty acid mixtures. **Food Hydrocolloids**, v. 27, p. 228-234, 2012.

KHATKAR, B. S.; SCHOFIELD, J. D. Dynamic rheology of wheat flour dough. I. Non-linear viscoelastic behaviour. **Journal of Science Food and Agricultural**, v. 82, p. 827–829, 2002.

KIBAR, E. A.; GÖNENÇ, I.; US, F. Modeling of retrogradation of waxy and normal corn starches. **International Journal of Food Properties**, v. 14, p. 954-967, 2010.

LETANG, C.; PIAU, M.; VERDIER, C. Characterization of wheat Flour ± water doughs. Part I: Rheometry and microstructure. **Journal of Food Engineering**, v. 41, p.121-132, 1999.

MANDALA, I.; POLAKI, A.; YANNIOTIS, S. Influence of frozen storage on bread enriched with different ingredients. **Journal of Food Engineering**, v. 92 n. 2, p. 137–145, 2009.

MANSO, J.; MENA, M. L.; YÁÑEZ-SEDEÑO, P.; PINGARRÓN, J. M. Bioenzyme amperometric biosensor using gold nanoparticle-modified electrodes for the determination of inulin in foods. **Analytical Biochemistry**, v. 375, p. 345–353, 2008.

MARTIN, M. L.; ZELEZNAK, K. J.; HOSENEY, R. C. A mechanism of bread firming I: Role of starch swelling. **Cereal Chemistry**, v. 68, n. 5, p. 498–503, 1991.

MASI, P.; CAVELLA, S.; SEPE, M. Characterization of dynamics viscoelastic behavior of wheat flour doughs at different moisture contents. **Cereal Chemistry**, v. 75, p. 428-432, 1998.

McCANN, T. H.; DAY, L. Effect of sodium chloride on gluten network formation, dough microstructure and rheology in relation to breadmaking. **Journal of Cereal Science**, v.57, p. 444-452, 2003.

MESTRES, C. Los estados físicos del almidón. In: **Conferencia Internacional de Almidón**. Quito, 1996. p. 1-2.

MEYER, D.; PETERS, B. Enhancing the nutritional value of bread with inulin. **Agro Food Industry Hi-Tech**, v. 20, n. 3, p.48-50, 2009.

MIRANDA, M. Z.; EL-DASH, A. Farinha integral de trigo germinado. Características nutricionais e estabilidade ao armazenamento. **Revista Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia dos Alimentos**, v. 22, n.3, p.216-223, 2002.

MIRANDA, M. Z.; MORI, C.; LORINI, I. **Qualidade comercial do trigo brasileiro: Safra 2006**. Documentos online 112. Passo Fundo-RS, Embrapa Trigo, 2009.

MÓDENES, A. P.; SILVA, A. M.; TRIGUEROS, D. E. G. Avaliação das propriedades reológicas do trigo armazenado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 3, p. 508–512, 2009.

MORITA, N., MAEDA, T., MIYAZAKI, M., YAMAMORI, M., MIURA, H., OHTSUKA, I. Dough and baking properties of high-amylose and waxy wheat flours. **Cereal Chemistry**, v. 79, p. 491-495, 2002.

MORRIS, C.; MORRIS, G. A. The effect of inulin and fructo-oligosaccharide supplementation on the textural, rheological and sensory properties of bread and their role in weight management: A review. **Food Chemistry**, v. 133, n. 2, p. 237-248, 2012.

MORRISON, W. R.; LAW, R. V.; SNAPE, C. E. Evidence for inclusion complexes of lipids with V-amylose in maize, rice and oat starches. **Journal of Cereal Science**, v.18, p.107–109, 1993.

NAKAKUKI, T. **Oligosaccharides: Production, Properties and Application**. 3. ed. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1993. p. 235.

NARA, S.; KOMIYA, T. Studies on the relationship between water-saturated state and crystallinity by the diffraction method for moistened potato starch. **Starch/Staerke**, v.35, n. 12, p.407-410, Oct. 1983.

OLIVEIRA, D. S. de, **Aplicação de xilanase e/ou ciclodextrina glicosiltransferase (CGTase) na produção de pães**. 2010. 158f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2010.

OLIVEIRA, D. S.; TELIS-ROMERO, J.; DA-SILVA, R.; FRANCO, C. M. L. Effect of a *Thermoascus aurantiacus* thermostable enzyme cocktail on wheat bread quality. **Food Chemistry**, v. 143, n. 2014, p. 139-146, 2014.

ORMENESE, R. S. C., **Obtenção de farinha de banana verde por diferentes processos de secagem e aplicação em produtos alimentícios**. Campinas, 2010. 182p. Tese (Doutora em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2010.

ORTOLAN, F.; HECKTHEUER, L. H.; MIRANDA, M. Z. Efeito do armazenamento à baixa temperatura (-4 °C) na cor e no teor de acidez da farinha de trigo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 1, p. 55-59, 2010.

OZKAN, N.; XIN, H.; CHEN, X.D. Application of a depth sensing indentation hardness test to evaluate the mechanical properties of food materials. **Journal Food Science**, v. 67, p.1814–1934, 2002.

OWENS, G. Cereal processing technology. In: CAUVAIN, S. P. **Breadmaking**. 1 ed. Boca Ration: CRC Press, 2001, p. 204-228.

PEREIRA, K.D. Amido resistente, a última geração no controle de energia e digestão saudável. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, p. 88-92, 2007.

PERESSINI, D.; SENSIDONI, A. Effect of soluble dietary fibre addition on rheological and breadmaking properties of wheat doughs. **Journal of Cereal Science**, v. 49, n. 2, p. 190–201, 2009.

PEIGHAMBARDOUST, S.H.; VAN DER GOOT, A.J.; VAN VLIET, T.; HAMER, R. J.; BOOM, R.M. Microstructure formation and rheological behaviour of dough under simple shear flow. **Journal of Cereal Science**, v. 43,n. 2, p. 183–197, Mar. 2006.

PIZZINATO, A. **Qualidade da farinha de trigo: Conceitos, fatores determinantes, parâmetros de avaliação e controle**. ITAL – Chocotec. 1997.

PRIMO-MARTÍN, C.; VAN NIEUWENHUIJZEN, N. H.; HAMER, R. J.; VAN VLIET, T. Crystallinity changes in wheat starch during the bread-making process: Starch crystallinity in the bread crust. **Cereal Science**, v. 45, p. 219-226, 2007.

PROSKY, L.; ASP, NG.; SCHWEIZER, TF.; DEVRIES, JW.; FURDA, I. Determination of insoluble, soluble and total dietary fiber in foods and food products: Interlaboratory study. **Journal of the Association of Official Analytical Chemists**, v. 71, p.1017-1024, 1988.

PUPPO, M.; CALVELO, A.; AÑÓN, M. C. Physicochemical and rheological characterization of wheat flour dough. **Cereal Chemistry**, v. 82, n. 2, p. 173-181, 2005.

QUAGLIA, G.B. ; L. GENNARO. Enzymes - Uses in Food Processing. En: Macrae, R., R.K. Robinson, & M.J. Sadler (Eds.). Encyclopedia of food sciences and nutrition. **Academic Press**, London. 2003, p. 2125-2139.

RENZETTIA, S.; BELLOA, F. D.; ARENDT, E. K. Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free flours treated with a microbial transglutaminase. **Journal of Cereal Science**, v. 48, p.33–45, 2008.

RIBOTTA, P. D.; LE BAIL, A. Thermo-physical assessment of bread during staling. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, V. 40, n. 5, p. 879-884, 2007.

ROBERFROID, M. B. Inulin-Type Fructans: Functional Food Ingredients. **Journal of Nutrition**, v. 137, n. 11, p.2493–2502, 2007.

ROBERFROID, M.; GIBSON, G. R.; HOYLES, L.; MCCARTNEY, A. L.; RASTALL, R.; ROWLAND, I. Prebiotic effects: metabolic and health benefits. **British Journal of Nutrition**, v.104, n. 2, p. S1–S63, 2010.

RONDA, F.; QUILEZ, J.; PANDO, V.; ROSS, Y. H. Fermentation time and fiber effects on recrystallization of starch components and staling of bread from frozen part-baked bread. **Journal of Food Engineering**, v. 131, p. 116-123, 2014.

ROSELL, C.M.; SANTOS, E.; COLLAR, C. Gelatinization and retrogradation kinetics of high-fiber wheat flour blends: A calorimetric approach. **Cereal Chemistry**, v. 85, n. 4, p. 457–465, 2008.

ROSELL, C. M.; SANTOS, E. Impact of fibers on physical characteristics of fresh and staled bake off bread. **Journal of Food Engineering**, v. 98, p. 273–281, 2010.

ROSELL, C. M.; SANTOS, E.; COLLAR, C. Physical characterization of fiber-enriched bread doughs by dual mixing and temperature constraint using the Mixolab. **European Food Research and Technology**, v. 231, p. 535–544, 2010.

RUAN, R.; ALMAER, S.; HUANG, V. T.; PERKINS, P.; CHEN, P.; FULCHER, R. G. Relationship between firming and water mobility in starch-based food systems during storage. **Cereal Chemistry**, v. 73, n. 3, p. 328-332, 1996.

SALVADOR, A.; SANZ, T.; FISZMAN, S. M. Dynamic rheological characteristics of wheat flour–water doughs. Effect of adding NaCl, sucrose and yeast. **Food Hydrocolloids**, v.20, p. 780–786, 2006.

SAJILATA, M. G.; SINGHAL, R. S.; KULKARNI, P.R. Resistant starch – A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 5, n.1, p. 1-17, 2006.

SANZ-PENELLA, J. M.; WRONKOWSKA, M.; SORAL-ŚMIETANA, M.; COLLAR, C.; HAROS, M. Impact of the addition of resistant starch from modified pea starch on dough and bread performance, **Eur. Food Res. Technol**, v. 231, p. 499-508, 2010.

SCHEUER, P. M.; FRANCISCO, A.; MIRANDA, M. Z.; LIMBERGER, V. M. Trigo: características e utilização na panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, n. 2, p.213-224, 2011.

SHAH, A. R.; SHAH, R. K.; MADAMWAR, D. Improvement of the quality of whole wheat bread by supplementation of xylanase from *Aspergillus foetidus*. **Bioresouce Tecnology**, v. 97, p. 2047-2053, 2006.

SINGH, N.; SINGH, J.; KAUR, L.; SODHI, N. S.; GILL, B. S. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chemistry**, v. 81, n. 2, p. 219-231, 2003.

SINGH, S.; SINGH, N.; ISONO, N.; NODA, T. Relationship of Granule Size Distribution and amylopectin structure with pasting, thermal, and retrogradation properties in wheat starch. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, p. 1180–1188, 2010.

SLAVIN, J. Why whole grains are protective: biological mechanisms. **Proceedings of the Nutrition Society**, v.62, n.1, p. 129-134, 2003.

STATSOFT, 2007. **STATISTICA** (data analysis software system). version 7. Disponível em: <www.statsoft.com>. Acesso em: março de 2014.

STAUFFER, C. E. Principles of Dough formation In CAUVAIN, S. P.; YOUNG, L.S. **Technology of Breadmaking**, London: Blackie Academic & Professional, 1998. p. 262-295.

THOMAS, D. J.; ATWELL, W. A. **Starch**, 1 ed. St. Paul: Eagan Press, 1999.

VAN de VELDE, F.; WEINBRECK, F.; EDELMAN, M.W.; VAN DER LINDEN, E.; TROMP, R.H. Visualisation of biopolymers mixtures using confocal scanning laser microscopy (CSLM) and covalent labelling techniques. **Colloids and Surface B: Biointerfaces**, v. 31, n. 1-4, p. 159–168, Sept. 2003

WALKER, C.E.; HAZELTON, J.L. Dough rheological tests. **Cereal Foods World**, v.41, p. 23-28, 1996.

WANG, J. S.; ROSELL, C. M.; DE BARBER, C. B. Effect of the addition of different fibres on wheat dough performance and bread quality. **Food Chemistry**, v. 79, n. 2, p. 221–226, 2002.

WEBER, F. H.; COLLARES-QUEIROZ, F. P.; CHANG, Y. K. Caracterização físico-química dos amidos de milho normal, ceroso e com alto teor de amilose. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, p. 748-753, 2009.

ZAIDUL, I. S. M.; YAMAUCHI, H.; KIM, S.; HASHIMOTO, N.; NODA, T. RVA study of mixtures of wheat flour and potato starches with different phosphorus contents. **Food Chemistry**, v. 102, p. 1105-1111, 2007.

ZIMERI, J.E.; KOKINI, J.L. Rheological properties of inulin-waxy maize starch systems. **Carbohydrate Polymers**, v. 52, n. 1, p. 67–85, 2003.

ZOBEL, H. F.; KULP, K. The Staling Mechanism. In: **Baked Goods Freshness**. In: HEBEDA, R. E., ZOBEL, H. F. 1 ed. Marcel Dekker, New York. 1996. p. 1-64.