

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ESTRUTURAS**

Avaliação do comportamento Não-Newtoniano de resinas compostas odontológicas: Um estudo analítico-experimental

Elissa Talma

Belo Horizonte, 05 de julho de 2016

2016
Elissa Talma

Avaliação do comportamento Não-Newtoniano de resinas compostas odontológicas: Um estudo analítico-experimental

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Max de Castro Magalhães
DEES, Universidade Federal de Minas Gerais.

Coorientador: Prof. Alex Siu-Lun Fok
MDRCBB, Minnesota Dental Research Center for Biomaterials and Biomechanics, University of Minnesota.

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

T151a

Talma, Elissa.

Avaliação do comportamento não-newtoniano de resinas compostas odontológicas [manuscrito] : um estudo analítico-experimental / Elissa Talma. – 2016.

39 f., enc.: il.

Orientador: Max de Castro Magalhães.

Coorientador: Alex Siu-Lun Fok.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 37-39.

Bibliografia: f. 36.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Resinas dentárias- Teses. 3. Fluidos newtonianos - Teses. 4. Modelos matemáticos - Teses. I. Magalhães, Max de Castro. II. Fok, Alex Siu-Lun. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)

2016
Elissa Talma

Avaliação do comportamento Não-Newtoniano de resinas compostas odontológicas: Um estudo analítico-experimental

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Max de Castro Magalhães

Coorientador: Prof. Alex Fok

Comissão avaliadora:

Prof. Max de Castro Magalhaes (Orientador)
DEES-UFMG

Prof. Alex Siu-Lun Fok (Coorientador)
MDRCBB- Universidade de Minnesota

Prof. Estevam Barbosa De Las Casas
DEES-UFMG

Prof. Nelson Renato França Alves da Silva
FO-UFMG

Prof. Tulimar Pereira Machado Cornachia
FO-UFMG

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

AGRADECIMENTOS

Agradeço os meus orientadores e professores Estevam Barbosa de Las Casas e Max de Castro Magalhães, principais incentivadores e colaboradores desse trabalho.

Ao meu Coorientador Alex Fok por disponibilizar o seu laboratório e sua equipe para colocar em prática suas ideias brilhantes.

A “3M-ESPE, Saint Paul” pelo fornecimento das resinas utilizadas neste trabalho.

A CAPES pela bolsa de mestrado.

Aos amigos do grupo da Biomecânica.

À minha mãe e minha irmã sempre me dando força.

Ao João por estar sempre ao meu lado e torcendo para que tudo desse certo e ao Enzo por ser um menino bom e participativo.

Aos amigos do departamento de Biomecânica de Minneapolis, Carola, Young Heo, Bonita, Mike e Brian que me ajudaram e me acolheram enquanto estive em Minneapolis.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Descrição do trabalho	4
1.2	Objetivos.....	4
2	ESTRUTURAS DO DENTE E O PREPARO CAVITÁRIO	5
2.2	Propriedades de Manuseio da Resina Odontológica	7
2.3	Propriedades Mecânicas da Resina Odontológica	9
2.3.1	Reologia	9
2.3.2	Deformação, elasticidade e fluxo.	9
2.3.3	Comportamento Viscoelástico.	10
3	REVISÃO DE LITERATURA	11
4	MODELO MATEMÁTICO	17
5	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	21
5.1	Introdução	21
5.2	Preparações dos modelos para o teste.....	22
5.3	Análises dos dados	27
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
7	CONCLUSÕES	35
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
	ANEXO A "Carta de aceite da Universidade de Minnesota".....	37
	ANEXO B "Carta de Conclusão da Universidade de Minnesota".....	38
	ANEXO C "Carta de aceite de coorientação do Prof. Alex Fok"	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-Aderência da resina na superfície do dente.....	3
Figura 1.2 Aderência da resina na espátula odontológica	3
Figura 2.1- Estrutura do dente.	5
Figura 2.2- Preparo cavitário.....	6
Figura 2.3-Preparo cavitário Classe II.	7
Figura 2.4-Paredes do prepáro cavitário.	7
Figura 2.5- Características de manuseio: a) desmoronamento (slumping); b) pegajosidade (stickiness); c) fluidez (flow); d) espalhamento (spreadability).Pegajosidade (Stickiness).	8
Figura 2.6- Figura de tensão x deformação, comportamento da fase elástica e da fase plástica.	9
Figura 2.7- Curvas de fluxo de alguns fluidos.	10
Figura 4.1- Comportamento de um material Não-Newtoniano..	17
Figura 4.2- Representação de um cone de altura (h) e raio (r)	18
Figura 5.1- Resinas odontológicas utilizadas no experimento.	22
Figura 5.2- Imagem do filme produzido pela câmera digital dentro da caixa com controle de temperatura.	24
Figura 5.3-Caixa térmica com controle de temperatura desenvolvida no laboratório da Universidade de Minnesota	24
Figura 5.4- Foi utilizada uma luz amarela, cujo comprimento de onda não interfere nas propriedades da resina e ao mesmo tempo proporciona iluminação suficiente para uma boa imagem durante as filmagens.	25
Figura 5.5- Câmera digital acoplada à caixa térmica e pode observar também o termostato mostrando em verde a temperatura a ser alcançada e em vermelho a temperatura do momento.	25
Figura 5.6- Dispositivo para moldagem do cone com acionamento fora da caixa para evitar sua abertura e conseqüentemente causar variação na temperatura do sistema.....	26
Figura 5.7- Abertura na lateral da caixa coberta com vidro para poder visualizar o posicionamento do cone durante as filmagens do “slumping”.	26
Figura 6.1- Gráfico do tempo X variação da altura da resina Z250 com temperatura de 25°C.	29
Figura 6.2- Gráfico do tempo X variação da altura da resina Z250 com temperatura de 37°C.	29
Figura 6.3- Gráfico do tempo X variação da altura da resina GDx com temperatura de 25°C.	30
Figura 6.4- Gráfico do tempo X variação da altura da resina Z250 com temperatura de 37°C.	30
Figura 6.5- Gráfico de Tensão (Pa) X Taxa de Deformação s^{-1} da resina Z250 à 25°C.	32
Figura 6.6- Gráfico de Tensão (Pa) X Taxa de Deformação s^{-1} da resina Z250 à 37°C.	32
Figura 6.7- Gráfico de Tensão (Pa) X Taxa de Deformação s^{-1} da resina GDx à 25°C.	33
Figura 6.8- Gráfico de Tensão (Pa) X Taxa de Deformação s^{-1} da resina GDx à 37°C.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1- Informações fornecidas pelos fabricantes das resinas.	22
Tabela 5.2- Exemplo de um grupo de dados obtidos pela medição da variação da altura do cone durante 40 segundos.....	28
Tabela 6.1- Valores de m e k de cinco amóstras da resina Z 250 à 25°C.	31
Tabela 6.2- Valores de m e k de cinco amóstras de resina Z250 à 37°C.	31
Tabela 6.3- Valores de m e k de cinco amóstras de resina GDX à 25°C.	31
Tabela 6.4- Valores de m e k de cinco amóstras de resina GCX à 37°C.	31

Dedico esta dissertação a minha mãe Nires e a minha irmã
Elenne pelo apoio incondicional.
Ao João, meu grande companheiro nessa jornada, sempre
me incentivando, dando suporte e carinho.
E ao meu filho,
Enzo, um estímulo diário com seu encanto e alegria pela
vida.

“ANIMULA, VAGULA, BLANDULA
HOSPES COMESQUE CORPORIS
QUAE NUNC ABIBIS IN LOCA
PALLIDULA, RIGIDA, NUDULA,
NEC, UT SOLES, DABIS IOCOS.”
—P. AELIUS HADRIANUS IMP. (138)

Resumo

O objetivo principal deste estudo é validar uma equação analítica para caracterizar o comportamento mecânico de amostras de resinas compostas em forma de cone. A avaliação será realizada com base nas propriedades físicas e reológicas fundamentais das resinas compostas. A solução será verificada com medições contínuas da altura do cone através de imagens de vídeo. Esse modelo matemático pode fornecer orientações úteis para os dentistas e cientistas de materiais na avaliação da resistência ao “slumping” em resinas compostas.

Palavras-chave: Resina composta, comportamento Não-Newtoniano, propriedades reológicas, propriedades de manipulação, modelo matemático.

Abstract

The aim of this study is test an analytical equation to characterize the mechanical behavior of cone-shaped specimens of resin composites based on their fundamental physical and rheological properties. The solution will be verified with continuous measurements of the cone height based on video images. Such a mathematical model can provide useful guidelines for dental clinicians and material scientists in assessing the slumping resistance of composites.

Keywords: composite resin, slumping, rheological properties, handling properties, Mathematical model.

1 Introdução

Resinas compostas são cada vez mais utilizadas na clínica odontológica devido as suas propriedades mecânicas e estéticas altamente melhoradas, uma vez que elas são cada vez mais específicas para cada tipo de restauração e suas propriedades de manipulação são parâmetros importantes para os profissionais em sua seleção [1,2].

A resina composta ideal uma vez retirada do tubo e aplicada à cavidade no dente, não deve fluir até que uma pressão seja aplicada para esculpir uma cúspide, um sulco ou uma crista marginal e deve ter a capacidade de manter a forma esculpida até que seja fotopolimerizada. Entretanto, quando a resina composta preenche uma cavidade pela pressão de um condensador manual, é desejável que a resina flua para as áreas em que seja necessário o preenchimento; e quando a pressão for removida, a resina deverá permanecer adaptada às paredes da cavidade (Figs. 1.1 e 1.2). Dessa forma, não deverá descolar das paredes durante a retirada do instrumento que a aplicou, se a resina aderir ao instrumento, esta poderá ser puxada para trás quando o instrumento for removido, o que conduz à abertura marginal [3].

Uma das propriedades de manuseio é o “slumping”; dentre outros que incluem a elasticidade e a fluidez [1,4]. “Slumping” é a deformação das resinas compostas odontológicas, ainda não polimerizadas, sob a influência da gravidade, e está diretamente relacionado com as propriedades reológicas, como a viscosidade [4,5]. O “slumping” pode afetar o processo restaurador em termos de tempo de procedimento e, conseqüentemente, na qualidade de uma restauração.

As propriedades de manuseio de uma resina composta são influenciadas pela sua composição, que consiste basicamente numa matriz de monômero à base de resina, tais como bisfenolglicidil metacrilato (BISGMA), e cargas inorgânicas tais como dióxido de silício (sílica). O balanço da proporção entre carga e matriz, ou a porcentagem de carga inserida na matriz, influenciam diretamente as propriedades físicas e mecânicas de uma resina composta [2-5]. Em geral, a viscoelasticidade das resinas compostas é afetada pelos diferentes monômeros utilizados e pela proporção dos mesmos como componentes da matriz de resina, bem como pelo tamanho, quantidade e forma das partículas da carga inorgânica. [6, 7]. Há uma relação direta entre o aumento da porcentagem de carga e a viscosidade, o que geralmente resulta em viscosidade mais elevada e, por conseguinte, queda da resistência ao “slumping”. O outro fato relevante é a relação entre a temperatura e a viscosidade do fluido. Com o aumento da temperatura, a viscosidade das resinas compostas diminui [7,8].

Estudos anteriores sobre o “slumping” apenas compararam a consistência dos materiais, que é a capacidade de retenção da forma antes da cura, sem a realização de uma avaliação quantitativa das suas propriedades elásticas e da viscosidade, bem como as suas relações com a resistência do “slumping” [9,10,11].

Chiang *et al.* [9] investigaram as características do “slumping” em quatro diferentes resinas compostas durante a escultura antes da sua polimerização. Modelos de silicone do plano oclusal de três molares diferentes foram utilizados como moldes para as amostras de resina. A superfície das amostras foi digitalizada com um scanner a laser para obter 400 fatias com uma resolução lateral de 25µm. Escaneamento das amostras foram feitos logo após a moldagem e novamente após 1-4 min. Os conjuntos de dados 3D foram numericamente sobrepostos com o software e as diferenças correspondentes foram calculadas em relação à medida de referência.

Lee *et al.* [10] desenvolveram um método para a medição da resistência do “slumping”, o índice de resistência do “slumping” (SRI) foi definido como a razão entre a profundidade da impressão do espécime antes do “slumping” e depois do “slumping” em resinas compostas. Duas marcas comerciais microhíbridas (Z100 e Z250, 3M ESPE) e uma de nanopartículas (Z350) foram avaliadas. Foram produzidos espécimes em forma de disco de 2 mm de espessura. Três tipos de moldes de alumínio, triangular, circular e quadrado, foram pressionados para fazer impressões padronizadas nos discos de resina. As impressões foram imediatamente fotopolimerizadas após a formação da impressão, e também após um tempo de espera de 2 min a 25°C para que ocorresse o “slumping”. Moldes de réplicas de gesso das impressões foram feitas e analisadas em busca de sua topografia utilizando um laser 3-D profilometer. A tendência ao “slumping” poderia ser quantificada pelo método de impressão e SRI.

Lee *et al.* [11] desenvolveram um método para a medição do “slumping” em resinas compostas fluidas. Utilizaram-se cinco resinas compostas fluidas comerciais. Um volume fixo de cada composto foi dispensado a partir de uma seringa sobre uma lâmina de vidro usando um dispositivo de carregamento feito para o experimento. A resina composta fluiu durante 10seg a 25°C, e em seguida foi fotopolimerizado. As relações de aspecto, altura e diâmetro, de cone ou em forma de cúpula dos espécimes foram medidas para estimar o “slumping” das resinas analisadas.

A proposta desse trabalho é validar uma equação analítica desenvolvida para caracterizar o comportamento mecânico de amostras de resinas compostas em forma de cone com base nas suas propriedades físicas e reológicas fundamentais. A solução será verificada com medições

contínuas da altura do cone utilizando imagens de vídeo. Esse modelo matemático pode fornecer informações úteis para os dentistas e cientistas de materiais uma vez que através deste modelo o comportamento mecânico das resinas pode ser estimado 'a priori'.



Figura 1.1 - Aderência da resina na superfície do dente.



Figura 1.2 - Aderência da resina na espátula odontológica.

1.1 Descrição do trabalho

A literatura descreve o comportamento e as propriedades mecânicas de várias resinas compostas. Entretanto as características de manuseio são pouco abordadas e têm uma importância significativa para os dentistas que se preocupam com o desempenho dos materiais durante os tratamentos odontológicos que estão diretamente relacionadas com a viscosidade, consistência, elasticidade e escoamento. O conhecimento das propriedades de manuseio das resinas odontológicas é um parâmetro importante para os profissionais na escolha do material para o tratamento clínico.

Ainda não existe uma quantificação das características de manuseio o que facilitaria a comunicação entre o fabricante e os dentistas. A proposta deste trabalho é validar uma equação que quantifique o “slumping” que é uma das características de manuseio.

1.2 Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo validar um modelo matemático criado pelo Professor Alex Fok, através de ensaios experimentais utilizando imagens de vídeo e fazendo medições regulares da altura em relação ao tempo, de forma a quantificar o “slumping” que ocorre nas resinas odontológicas.

Para atingir tal propósito, as seguintes etapas são necessárias:

- I. Elaborar e confeccionar moldes em forma de cone.
- II. Selecionar as resinas adequadas para o teste de “slumping”.
- III. Testar os moldes e o ambiente para realizar os experimentos.
- IV. Preparar e ajustar a câmera digital para produzir imagens nítidas.
- V. Determinar o tempo de filmagem.
- VI. Confeccionar uma caixa térmica com controle de temperatura.
- VII. Instalar e utilizar o software “ImageJ” para análise das imagens.
- VIII. Transferir os dados obtidos com as imagens e as equações para o Excel.
- IX. Plotar os gráficos do tempo em relação à variação da altura dos corpos de prova.
- X. Obter os valores de m e k com a aplicação dos dados obtidos com o experimento na equação a ser validada.
- XI. Plotagem dos gráficos de Tensão em relação à Taxa de Deformação.

2 Estruturas do dente e o preparo cavitário

2.1 Introdução

O dente apresenta duas estruturas mineralizadas e a polpa. A camada mais externa da superfície do dente é o esmalte, tecido mais mineralizado de todo o corpo humano. A camada situada abaixo do esmalte é a dentina, constituída de microtúbulos que se comunicam diretamente à polpa do dente. O dente possui uma câmara oca onde se aloja a polpa, tecido mole, onde se encontram o nervo e os vasos sanguíneos (Fig.2.1).

A cárie pode atingir diferentes partes e profundidade do dente, por esse motivo o preparo cavitário varia muito. Quando o dentista restaura um dente que foi danificado por qualquer motivo, cárie ou fratura, ele tem que pensar no tipo de material que ele irá usar de acordo com o tipo de preparo cavitário. Por isso a importância das características de manuseio, onde o “slumping” da resina deve ser determinado. Se for preencher com resina um preparo cavitário maior e profundo pode-se usar uma resina com um “slumping” maior, se for esculpir a camada mais externa do dente, uma resina com um “slumping” menor seria mais indicada.

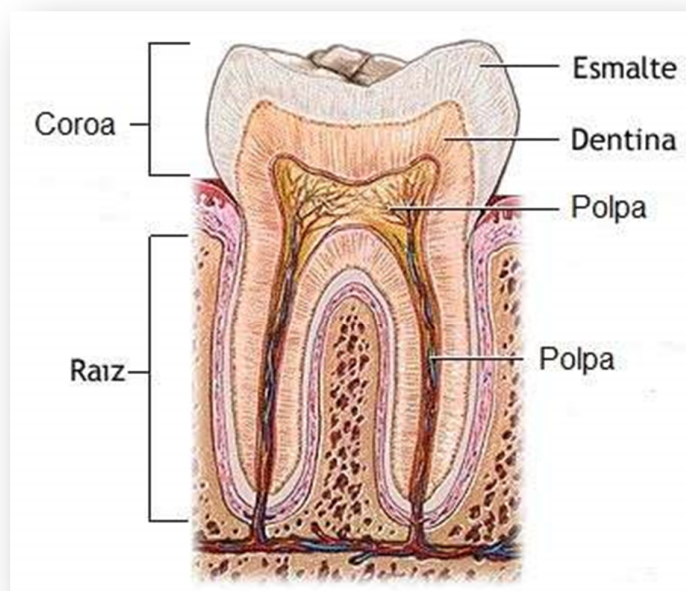


Figura 2.1- Estrutura do dente.

O dente quando sofre algum processo destrutivo, seja por lesão de cárie ou fratura deve ser preparado para receber um material restaurador. A concepção do preparo de cavidade e os detalhes da sua forma dependem do material a ser usado para a restauração (Fig. 2.2).

Mondelli define o preparo cavitário sob o ponto de vista terapêutico, como sendo o tratamento biomecânico da cárie e de outras lesões dos tecidos duros do dente, a fim de que as estruturas remanescentes possam receber uma restauração que as proteja, que seja resistente e que previna a reincidência de cárie [12] (Figs. 2.3).

Uma das constantes preocupações a respeito da longevidade clínica de restaurações de resina composta é exatamente a possibilidade de infiltração das margens, que favorece a ocorrência de cáries adjacentes e manchamento marginal. Na tentativa de reduzir o potencial dos defeitos marginais, mecanismos compensatórios têm sido propostos, dentre eles o uso de resinas de baixa viscosidade. O conhecimento das características de manuseio pode ajudar os dentistas na escolha da resina mais adequada ao tipo de preparo. Por exemplo, uma resina com um “slumping” maior se adaptaria melhor às paredes do preparo na primeira camada e depois poderia usar uma resina com um “slumping” menor para poder esculpir o dente e finalizar o preparo.

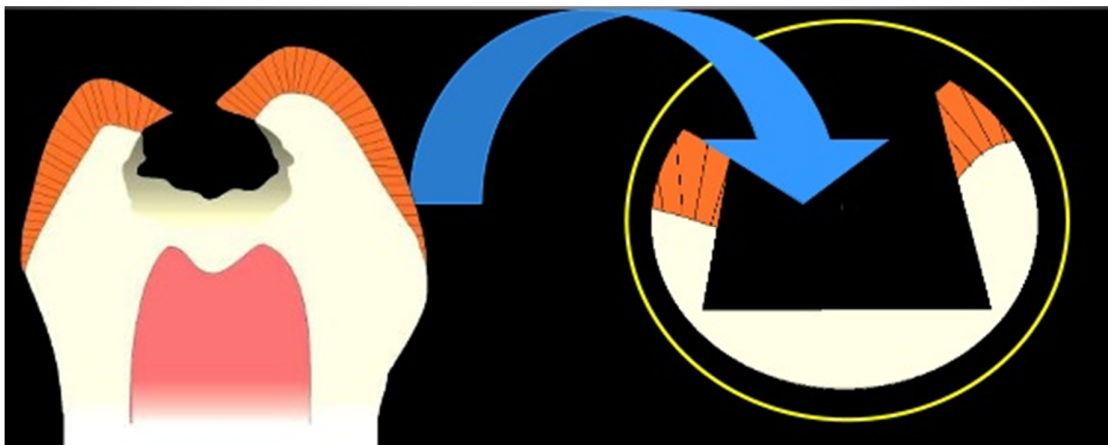


Figura 2.2- Preparo cavitário.



Figura 2.3- Preparo cavitário classe II.

2.2 Propriedades de Manuseio da Resina Odontológica

As resinas odontológicas variam não somente em sua composição, mas também nas suas características de manuseio. Cada um desses fatores influenciará no desempenho clínico. As resinas odontológicas estão disponíveis em várias consistências e embalagens. Os dentistas podem decidir qual material escolher baseado em suas preferências pessoais. A maioria dos dentistas tem se interessado pelas características de manuseio porque elas afetam a adaptabilidade da resina nas paredes do preparo cavitário (Fig.2.4), na modelagem da morfologia oclusal do dente e a não aderência nos instrumentos de aplicação da resina, os quais podem influenciar no tempo e na qualidade do tratamento.

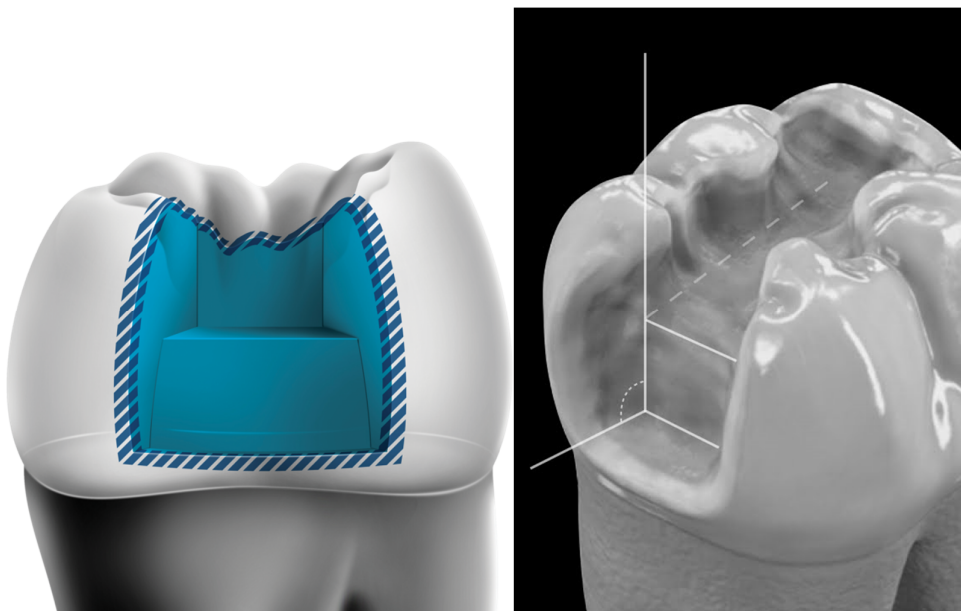


Figura 2.4- Paredes do preparo cavitário.

As características de manuseio (Fig.2.5) são classificadas em: desmoronamento (slumping), pegajosidade, fluidez e espalhamento.

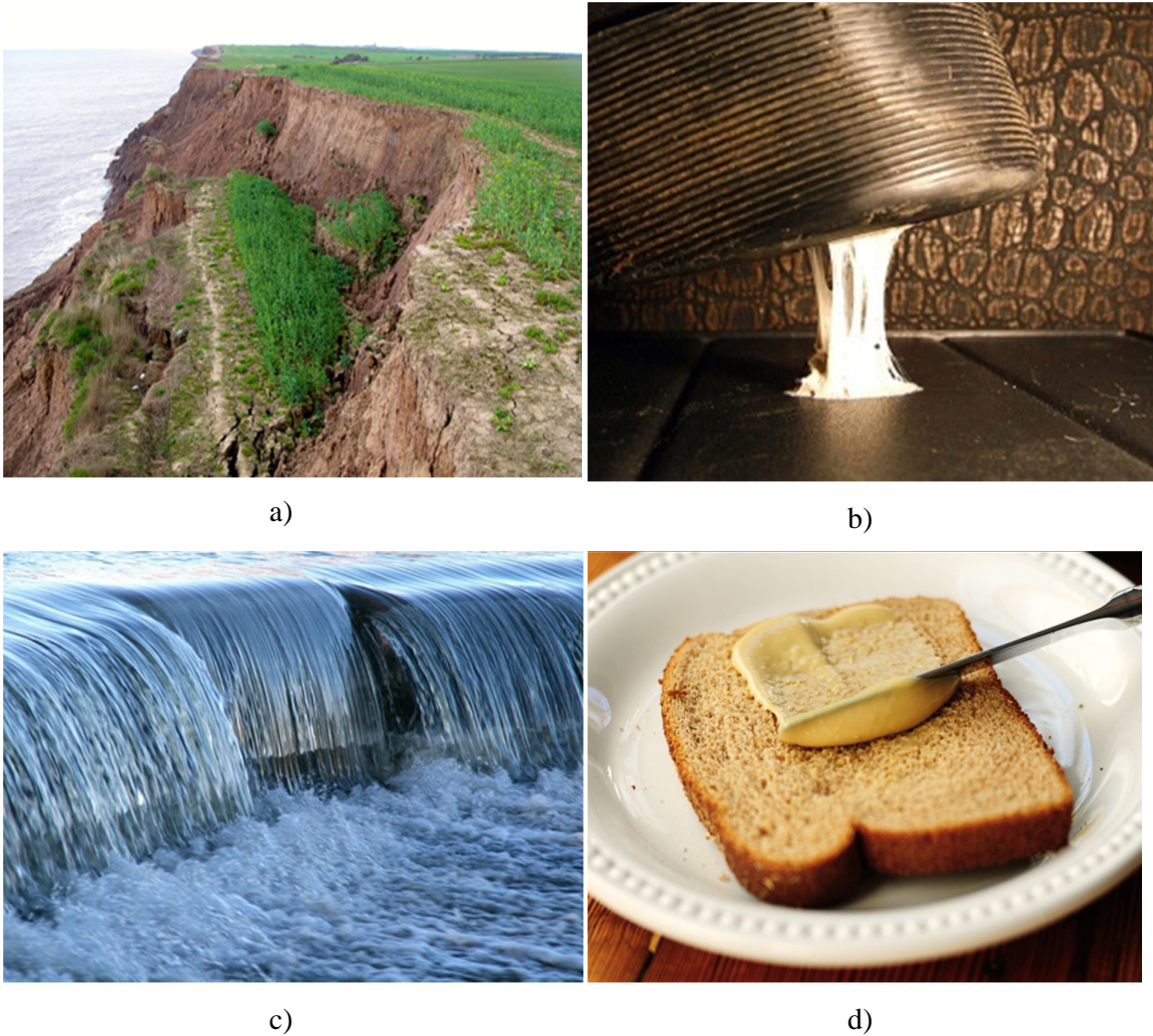


Figura 2.5 - Características de manuseio: a) desmoronamento (slumping); b) pegajosidade (stickiness); c) fluidez (flow); d) espalhamento (spreadability).

2.3 Propriedades Mecânicas da Resina Odontológica

2.3.1 Reologia

A melhor forma para se entender as características de manuseio é através da reologia. Reologia é a ciência que estuda a deformação e o fluxo da matéria. Como estamos trabalhando com resinas odontológicas, trata-se de um material viscoelástico, o qual apresenta comportamento dual, portanto não apresenta puramente características de líquido viscoso e nem de sólido elástico. A resina odontológica é um fluido Não-Newtoniano, onde a viscosidade varia de acordo com a taxa de cisalhamento. Para explicar essas características da resina odontológica e a origem da equação validada neste trabalho deve-se passar pelos fundamentos da reologia.

2.3.2 Deformação, elasticidade e fluxo

Denomina-se deformação de um corpo quando acontece qualquer variação na sua forma devido a uma ação externa. A deformação de um corpo pode ser elástica quando a deformação é transitória ou deformação plástica quando a deformação é permanente. Outro termo importante usado na reologia para deformação é o cisalhamento, também denominada de deformação viscosa nos estudos de escoamento ou fluxo de fluidos. O cisalhamento é definido em termos de taxa de deformação (Fig. 2.6).

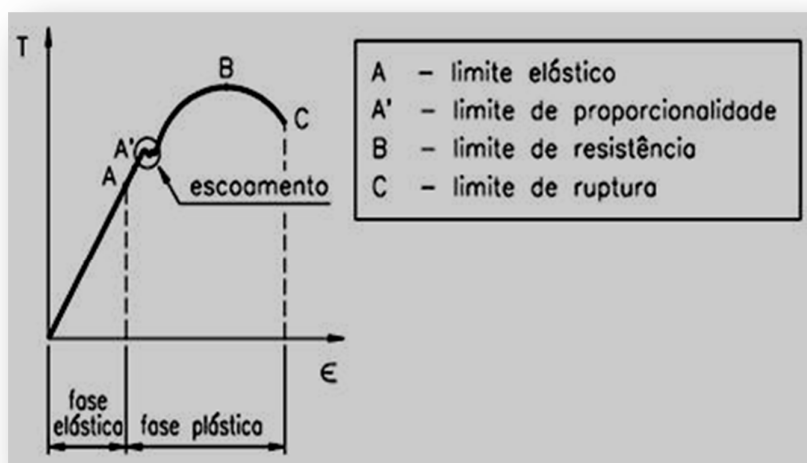


Figura 2.6 - Gráfico de tensão x deformação, comportamento da fase elástica e da fase plástica.

2.3.3 Comportamento Viscoelástico

Três termos básicos compõem as equações diferenciais combinando viscosidade e elasticidade: um elástico, envolvendo deformação; um viscoso, envolvendo taxa de deformação; e um inercial, envolvendo aceleração. A tensão total é a soma das tensões parciais de cada componente, enquanto as deformações são iguais. Quando o escoamento contínuo está plenamente estabelecido, a componente elástica pode ser desprezada, e o efeito viscoso prevalece. Para se avaliar o “slumping” em resinas odontológicas prevalece a componente viscosa. O comportamento dos fluidos puramente viscosos é definido pela relação entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento ou deformação. Uma curva de fluxo mostra como a tensão cisalhante varia em função da taxa de cisalhamento ou deformação. Os fluidos se classificam em Newtonianos e não-Newtonianos (Fig. 2.7).

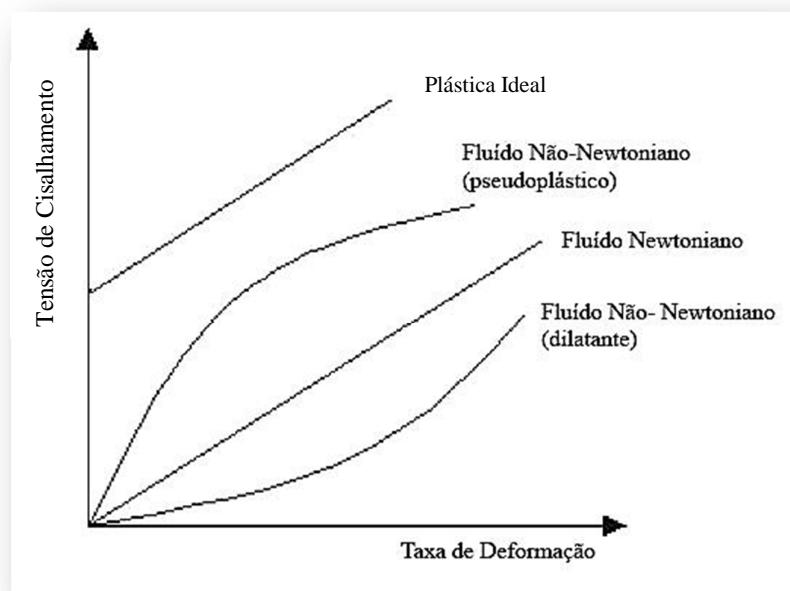


Figura 2.7- Curvas de fluxo de alguns fluidos.

Para um fluido Newtoniano a viscosidade é única e constante e, portanto, definida por viscosidade dinâmica absoluta. Exemplos desses fluidos são: ar, água, soluções salinas, mel e glicerina. Para um fluido não-Newtoniano, a viscosidade varia em função da taxa de cisalhamento e, portanto, denominada viscosidade aparente, isto é, viscosidade que o fluido teria se fosse Newtoniano naquela condição de fluxo [13].

3 Revisão de Literatura

Tyaset *et al.*(1998) [1] avaliaram um método para medir a consistência dos compósitos odontológicos. Foi selecionado quatorze resinas compostas comerciais, que tinham uma gama de consistências, avaliada subjetivamente. O material foi colocado num molde cilíndrico com 8 mm de diâmetro e profundidade de 8 mm, e uma vareta de vidro com 4,37 mm de diâmetro empurrados para o compósito em $24,4 \text{ mm min}^{-1}$ por 6 s, i.e., a uma profundidade de 2,44 mm. A força máxima atingida durante o período de 6 s foi gravado e usado como medida da consistência. Os valores de consistência variaram de 0,33 N a 31,3 N, com os valores mais elevados sendo encontrados para alguns dos materiais introduzidos recentemente “packable”. A fiabilidade do ensaio foi elevada. O teste pode ser útil como um método padrão de avaliação da consistência da resina composta. O comportamento reológico dos 14 materiais compósitos dentários comerciais na presente investigação é sem dúvida influenciada pelo volume das partículas de carga, forma da partícula, tamanho, distribuição do tamanho e a área de superfície da partícula de carga inorgânica. Além disso, o comportamento reológico de alguns materiais seria influenciado por fatores adicionais tais como a presença de constituintes orgânicos sólidos e outras técnicas de aglomeração. Uma ampla gama de valores para a consistência foi observada para certo número de materiais compósitos atualmente disponíveis. Não existe uma relação simples entre o conteúdo inorgânico de enchimento (% em peso) e a consistência dos materiais.

Willems *et al.*(1992) [2], categorizaram compósitos comercialmente disponíveis em função do tamanho médio das partículas, distribuição de carga, teor de carga, módulo de Young, rugosidade da superfície, resistência à compressão, dureza da superfície e a morfologia das cargas. Além desta informação, pode-se concluir que os materiais de escolha para restaurar cavidades posteriores no momento são os Composites Ultrafino Compact-Filled devido a sua rugosidade intrínseca de superfície, o módulo de Young e indiretamente, o seu teor de carga, resistência à compressão e dureza superficial são comparáveis às mesmas propriedades do esmalte e da dentina. Os compósitos ultrafinos Midway-Filled parecem ser materiais muito satisfatórios para uso anterior.

Lee *et al.*(2003) [3], descobriram que a viscosidade de materiais compósitos varia significativamente entre marcas, mesmo que sejam nominalmente da mesma classe ou tipo de material. Em restaurações posteriores, compósitos devem ser colocados em sucessivos incrementos para assegurar uma cura adequada. Além disso, a camada final deve apresentar

contornos oclusais. Se o composto não tem características de manipulação desejáveis, como a não aderência e “slumping”, não irá permanecer no local durante a manipulação e modelagem. Sob estas condições, o material poderá escoar e perder a forma anatômica antes da polimerização, exigindo, portanto, mais tempo de cadeira para posterior escultura e acabamento. Existem poucos estudos sobre o “slumping” de compósitos, que é uma característica clinicamente verificada em materiais.

Al-Sharaa *et al.* (2003) [4] descreveram e avaliaram um método para determinar uma medida laboratorial da pegajosidade, e fazer uma comparação entre vários compósitos odontológicos usando este método. Eles selecionaram doze resinas compostas comerciais. Cada material foi colocado num molde cilíndrico ($\varphi = 6,1 \times 2,2 \text{ mm}^2$ profundidade) realizadas a 23°C e a 37°C . Um instrumento de aço inoxidável de extremidade plana foi colocado sobre a superfície da amostra atuando com uma força de 350 g. Após 2 s foi movida verticalmente em 2 cm/s. Isto causou uma aderência do compósito e foi elevado a uma altura máxima entre 0,2 e 1,8 mm até que ocorresse o descolamento do instrumento. O material elevado foi imediatamente solidificado por fotoativação a 600 mW/cm^2 por 40 s. Estes perfis elevados foram mapeados em ambas as alturas e áreas da elevação projetada. Um instrumento foi construído para essa finalidade nos nossos laboratórios. Ambas as alturas e áreas projetadas foram avaliadas como medidas potenciais de pegajosidade. One-way ANOVA e testes de gama múltipla de Duncan foram utilizados para análise estatística. As alturas projetadas variaram entre 0,2-1,8 mm e áreas projetadas de elevação variaram entre 4,0-23,9 mm^2 . Os maiores valores foram encontrados para compósitos *microfine* pra restaurações anteriores (Siluxplus, Filtek A110). Houve uma diferença significativa ($p < 0,05$) entre o material (SX) e os demais materiais testados com a mais alta pegajosidade. Uma vez inserido e a carga removida, o material ideal deve permanecer no local. Isso geralmente acontece quando ocorre um aumento da viscosidade e uma diminuição da pegajosidade. O teste de pegajosidade descrito é original e pode provar ser útil como um método de teste padrão para caracterizar a pegajosidade no manuseio de compósitos odontológicos.

Taylor *et al.* (1998) [5], testaram as relações entre o tipo de partículas de carga, o teor de partículas de carga, a composição da matriz da resina, a viscosidade e as características de fluidez das formulações de pasta dos compósitos odontológicos. BIS-GMA e 10 análogos experimentais BIS-GMA foram diluídas conforme necessário com TEGDMA para produzir 1000 e 2000 soluções cp correspondentes à faixa de viscosidade de matrizes compostas comerciais. Todas estas resinas foram misturadas com partículas de carga híbridas e uma

micro-carga silanizada. Para cada combinação foi determinado o teor máximo de enchimento, bem como as consistências de pasta (plasticidades) a uma série de conteúdo de enchimento. As consistências das pastas foram medidas através de uma modificação dos métodos de especificação ADA desenvolvidos para a determinação consistências de Teste Padrão para cimentos de fosfato de zinco e silicato. Para cada monômero de carga a combinação de carga crescente resultou em plasticidades monotonicamente reduzidas. O teor máximo de enchimento pareceu ser um atributo da carga em particular, em vez da matriz nas características da resina. Para os materiais utilizados, os conteúdos máximos foram cerca de 86% em peso (83% em volume) de enchimento para o enchimento híbrido, e 36% em peso% (24% em volume) para o material microparticulado. Evidências foram encontradas de que a plasticidade varia com a composição de monômero de base e a quantidade de TEGDMA presentes. Os resultados implicam que as interações entre as partículas de carga e a matriz influenciam nos resultados quando todos os fatores mecânicos conhecidos são controlados.

Lee *et al.* (2007) [6] investigaram as propriedades viscoelásticas relacionadas com as características de manuseio de compósitos odontológicos. Constataram que a viscoelasticidade dos compósitos odontológicos, que influenciam as características de manipulação, é significativamente diferente entre as marcas. Eles usaram um reômetro de oscilação vertical especialmente desenvolvido para o experimento, *vertical oscillation rheometer (VOR)*. O VOR consiste em três partes: (1) uma unidade de medição, (2) uma unidade de indução deformação, e (3) uma unidade de detecção de força. Dois compósitos de viscosidade média, Z100 e Z250, e dois compósitos compactáveis, P60 e Sure Fil, foram testados. Um teste oscilatório dinâmico foi utilizado para avaliar o módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E''), e tangente de perda ($\tan\delta$) dos compósitos com uma função da frequência (ω) de 0,1 a 20 Hz, a 23°C. No presente estudo, apenas uma pesquisa fenomenológica, macroscópica das propriedades viscoelásticas de vários compósitos foi feita. Interpretações molecular e microscópicas destes resultados do ponto de vista dos efeitos dos componentes dos compósitos, isto é, o tipo de monômero, a forma e o tamanho do material de enchimento, a interação entre estes constituintes e aditivos menores, devem ser investigados. A reologia de compósitos formulados com vários monômeros e cargas, e a relação entre os dados reológicos medidos e as características de manipulação clínicos, tais como a adesão a um instrumento, adaptabilidade a superfície do dente, a resistência do “slumping” durante o esculpimento do dente, são assuntos para um estudo mais aprofundado. O VOR seria um dispositivo relativamente simples para analisar as propriedades reológicas

de compósitos odontológicos comerciais e experimentais em relação à sua composição e química.

Lee *et al.* (2006) [7] investigaram os efeitos de monômeros e das cargas de enchimento sobre as propriedades reológicas relacionadas com as características de manuseamento de resinas compostas. Uma matriz de resina em que Bis-GMA e TEGDMA se apresentam numa razão de 6:4, foi misturada a um silano de vidro de bário tratado (0.7 e 1.0 μm), sílica flambada de 0,04 μm ou sílica redonda de 0,5 μm . O tipo e a quantidade de cargas incorporadas foram variados para atingir diferentes níveis de viscosidade dos compostos testados. Cisalhamentos constantes e ensaios de cisalhamento dinâmico oscilatórios foram realizados com um reômetro. A viscosidade (η) da matriz de resina, o módulo de cisalhamento de armazenamento (G'), módulo de perda (G''), o módulo complexo (G^*), tangente de perda ($\tan\delta$), δ ângulo de fase e viscosidade complexa (η^*) dos compósitos foram avaliados em função da frequência $\omega = 0,1-100$ rad / s. Para investigar o efeito da temperatura sobre a viscosidade, um teste de varredura foi também realizado. As matrizes de resinas eram fluidos Newtonianos e todos os compósitos experimentados exibiram pseudoplasticidade. A viscosidade aumentou exponencialmente com o aumento do volume percentual de carga, mas diminuiu com o aumento da temperatura. Para as cargas com volumes idênticos, à medida que a carga diminuiu de tamanho a viscosidade aumenta. O efeito do tamanho da carga sobre a viscosidade foi intensificada com o aumento da quantidade de carga, e o aumento da quantidade de carga reduziu a $\tan\delta$. As propriedades reológicas dos compósitos relacionados com as características de manuseio foram grandemente influenciadas pela formulação do monômero e das cargas, a temperatura e a taxa de cisalhamento. Em um plano complexo foi um método valioso para representar as propriedades viscoelásticas dos compósitos.

Al-Ahdal *et al.* (2014) [8] estudaram os efeitos das variações na composição de resinas e das temperaturas (25° C e 37° C) nas propriedades reológicas das atuais resinas compostas. Foi utilizado quatorze resinas compostas comerciais com diferentes matrizes de Bis-GMA e TEGDMA, com diferentes carregamentos (41-65, v/v) e tamanhos de partículas (variando de 5nm a 20 mm) foram estudados usando placas paralelas. Medições de cisalhamento foram feitas para determinar a viscosidade de cada composto ao longo da faixa de frequência angular de $\omega = 10-4-102$ rad/s. Os dados foram analisados utilizando ANOVA. Todos os compósitos mostraram redução da viscosidade com a taxa de cisalhamento (pseudoplasticidade). Médias de viscosidade foram calculadas sobre o intervalo da taxa de cisalhamento. Estas viscosidades aumentaram à medida que a percentagem da carga de

preenchimento foi aumentando (em volume) variando entre 0,05-349,33 s kPa a 25 ° C e 0,03-132,00 s kPa a 37° C. Filtek Supreme XTE apresentou maior viscosidade nas duas temperaturas. Por outro lado, a Filtek Bulk Fill, apresentou a menor viscosidade em ambas as temperaturas. A viscosidade diminuiu de forma significativa com o aumento das temperaturas em todos os materiais. A redução variou de 40,8% (na Venus Diamond Flow) para 92,2% (na Spectrum TPH3). Observou-se uma variação considerável nas viscosidades de resinas compostas medidas a 25°C com um valor médio para a taxa de cisalhamento. As diferenças de formulação que levaram a uma grande variação foram principalmente: a fração de volume de cargas e o tamanho das partículas. Este estudo mostrou a influência das variáveis de composição de resinas compostas na viscoelasticidade de resinas compostas e suas características reológicas. Outras características de manipulação clínica destes materiais: viscosidade, consistência e “slumping” estão sendo investigados.

Chiang *et al.* (2008) [9] investigaram as características de “slumping” de quatro resinas compostas durante a escultura, antes da fotopolimerização. Quatro diferentes tipos de resinas compostas foram usados para medir a forma de deformação causada pelo “slumping”. Impressões de silicone de três diferentes molares foram usadas como molde para as amostras de resina composta. A superfície das amostras foi digitalizada usando um scanner a laser (400 fatias, resolução lateral: 25 µm). Os scanners foram feitos depois de 1-4 minutos. Os conjuntos de dados 3D foram numericamente sobrepostos de acordo com o software e correspondentes diferenças foram calculadas em relação à mediada de referência. A deformação da superfície aumenta com o aumento do tempo de observação. O coeficiente de variação média foi de 0,2. Os maiores “slumpings” foram observados na resina ELS (micro-hybrid composite) com o molde de dente 1 (150.0 µm), e na resina Clearfil Majesty (microcomposite) com o molde de dente 2 (98.3 µm) e molde 3 (42.8 µm). Miris2Dentin (nano-hybrid composite) e Synergy D6 Enamel (nano-hybrid composite) apresentaram bastante semelhantes e parecem exibir pouca deformação. O fluxo de slumping do ELS e Clearfil Majesty foi de até 400% maior que os primeiros moldes. A deformação pode ser classificada na seguinte ordem "molde 3" <"molde 2" <"molde 1" para todos os materiais em todo tempo de observação. Houve uma influência significativa dos três fatores, o tempo, o molde e o tipo de composto. Esse método especificamente fornece uma abordagem reprodutível para a avaliação das características de manuseio de resinas compostas. Os resultados podem identificar diferenças no “slumping” e ajudar na coleta de informações sobre a viabilidade de um material para determinadas indicações.

Lee *et al.* (2008) [10] desenvolveram um método para medir o “slumping” das resinas compostas e relacioná-lo com outras propriedades reológicas. Dois compósitos híbridos comerciais (Z100 e Z250) e um compósito nano fill (Z350) foram utilizados para fazer as amostras em forma de disco de espessura 2 mm. Três tipos de moldes de alumínio com superfícies de conte triangulares, circulares e quadradas foram pressionados para fazer impressões padronizadas. As impressões foram imediatamente fotopolimerizadas (sem “slumping”) ou depois de esperar por 2 min a 25 ° C (“slumping”). Réplicas de pedra branca foram feitas, em seguida análises topográficas foram feitas usando um laser 3-D. O índice de “slumping” (SRI-*Slumping Resistance Index*) foi definido pela razão entre a profundidade do sulco do espécime com “slumping” e o sem “slumping”. A pré-curva de viscoelasticidade foi avaliada por um ensaio de cisalhamento oscilatório e a tensão normal foi medida por um teste de compressão usando um reômetro. A análise de correlação foi realizada para investigar a relação entre as propriedades viscoelásticas e SRI. O SRI variou entre os três materiais (Z100 <Z250 <Z350) e as formas de cunho não afetaram o “slumping”. O SRI foi fortemente correlacionado com a perda do módulo de cisalhamento “G”, mas não com a perda da tangente. Além disso, o “slumping” está mais intimamente relacionado com a resistência ao cisalhamento de escoamento do que com a tensão normal. O “slumping” poderia ser quantificado utilizando o método das formas de cunha e o SRI. O índice pode ser aplicável para avaliar as características de manipulação clínicas de compósitos.

Lee *et al.* (2010) [11] desenvolveram um método para medir a tendências do “slumping” em resinas compostas fluidas e correlacionar os resultados com os obtidos a partir de métodos reológicos padrão. Foram utilizados cinco compósitos fluidos comerciais (RV Aelite Flo: AF, fluxo Filtek: FF, fluxo DenFil: DF, o fluxo Tetric:: TF e Revolution). Um volume fixo de cada compósito foi colocado sobre uma lâmina de vidro usando uma seringa sob um dispositivo de carregamento feito por encomenda. O compósito sofreu “slumping” durante 10 s a 25 ° C e polimerizados. A relação de aspecto (altura/diâmetro) do cone ou em forma de cúpula dos espécimes foi medida para estimar a tendência do “slumping” dos compósitos. A fim de investigar o “slumping” e as propriedades reológicas dos compósitos, a viscosidade complexa η^* de cada compósito foi mediada por um ensaio de cisalhamento oscilatório dinâmico ao longo de um intervalo de frequência angular $\omega = 0,1-100$ rad/s utilizando um reômetro. A análise de regressão foi realizada para investigar a razão em relação ao aspecto e a viscosidade complexa. A tendência ao “slumping” pode ser quantificada medindo a razão em relação ao aspecto do “slumping” dos compósitos de baixa viscosidade. Este método pode ser aplicado para avaliar as características de manuseamento clínico destes materiais.

4 Modelo Matemático

Neste capítulo será apresentado o modelo matemático que quantifica o “slumping” de corpos de prova na forma de cone, confeccionados com resinas compostas odontológicas antes da fotopolimerização e baseado nos princípios da Reologia.

A Reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento de corpos sólidos ou fluídos. Os conceitos de tensão de cisalhamento (σ) e taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) são usados para descrever a deformação e o escoamento do fluido.

Um fluido é caracterizado como Não-Newtoniano, quando a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional a taxa de deformação. Como consequência, fluidos Não-Newtonianos podem não ter uma viscosidade bem definida. Estes fluídos possuem uma estrutura que muda em função do tempo. Viscosidade é a medida da resistência interna de um fluido. Quanto maior a viscosidade, maior é a resistência ao movimento e menor é sua capacidade de escoar. A resina odontológica tem um comportamento Não-Newtoniano, por isso na figura (4.1), a tensão (σ) não varia linearmente com a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$).

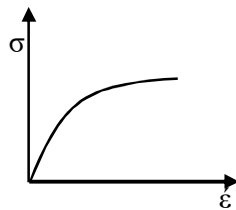


Figura 4.1 Comportamento de um material Não-Newtoniano.

Onde: $\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt}$

A tensão em um material de comportamento Não-Newtoniano, exemplificada na figura (4.1) é dada pela equação (4.1) abaixo:

$$\sigma = k \cdot \dot{\epsilon}^{\frac{1}{m}} \quad (4.1)$$

Na equação (4.1) σ = tensão normal, k é o índice de consistência (viscosidade) ($\text{Pa} \cdot \text{s}^{1/m}$) e m é a variável. Em um líquido Newtoniano m seria igual a 1 (um).

A forma de cone para moldar as resinas foi escolhida, pois o corpo de prova teria que ter um formato geométrico que escoasse por igual, poderia ser uma pirâmide, mas por esta ter quinas gerariam sombras durante as filmagens. A equação do volume da forma geométrica também

não poderia contribuir para uma equação muito complexa, pois fugiria do propósito de encontrar um facilitador para quantificar o “slumping”.

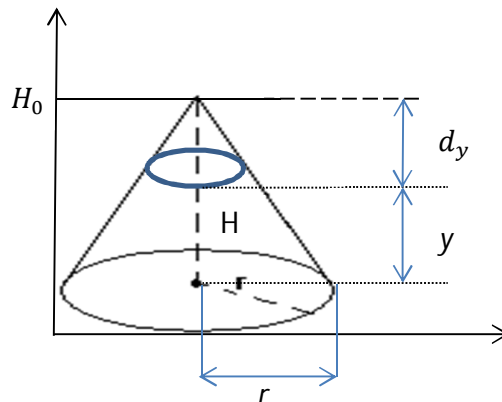


Figura 4.2 Representação de um cone de altura (H) e raio (r).

No cone são apresentados: a altura inicial (H_0) em mm, o raio (r) da circunferência da base do cone também em mm e (d_y) que representa a variação da altura do cone durante o tempo (t) (Fig.4.2). Aplicando o volume do cone ao comportamento Não-Newtoniano da resina e levando-se em conta a força da gravidade (g) e a densidade do material (ρ) obtemos a equação (4.6), em que se aplica a força da gravidade de 9800 mm/s^2 e a densidade das resinas Z250, 3M ESPE de $0,0021 \text{ g/mm}^3$ ou da Gradia Direct X, GC corporation, densidade $0,0016 \text{ g/mm}^3$, densidades informadas pelos fabricantes.

O volume de um cone (V) em mm pode ser calculado pela equação (4.2).

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h \quad (4.2)$$

Denomina-se tensão mecânica normal (σ) ao valor da distribuição de forças normal (F) por unidade de área (A) em torno de um ponto material dentro de um corpo material ou meio contínuo. As unidades são [Pa] (pascal = $[\text{N/m}^2]$), [MPa] = 10^6 [Pa] (e também $[\text{kN/cm}^2]$).

Representada pela fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.3)$$

Sabe-se que força (F) é massa (m') vezes a aceleração, no caso a aceleração aplicada é a da gravidade (g):

$$F = m' \cdot g \quad (4.4)$$

E que massa (m') é volume (V) vezes a densidade (ρ):

$$m' = v. \rho \quad (4.5)$$

Aplica-se o volume do cone e a aceleração empregada é a da gravidade (g):

$$\sigma = \frac{-\frac{1}{3}\pi r^2(H-y)\rho g}{\pi r^2} \quad (4.6)$$

Simplificando:

$$\sigma = -\frac{1}{3} (H - y) \rho g \quad (4.7)$$

Aplica-se a equação (4.1) na equação (4.7):

$$K. \dot{\epsilon}^m = -\frac{1}{3} (H - y) \rho g \quad (4.8)$$

Coloca-se a deformação (ϵ) em evidência:

$$\dot{\epsilon} = (-1)^m \left(\frac{1}{3K}\right)^m \cdot (H - y)^m \cdot (\rho g)^m \quad (4.9)$$

A variação “ Δ ” da altura do cone pode ser representada por:

$$\Delta = H_0 - H \quad (4.10)$$

O “ H_0 ” é a altura inicial e “ H ” é a altura final, que varia com o tempo.

A variação “ Δ ” também pode ser representada pela equação:

$$\Delta = -\int_0^H \epsilon dy \quad (4.11)$$

Já a taxa de variação da altura é dada por:

$$\frac{d\Delta}{dt} = -\int_0^H \frac{d\epsilon}{dt} dy = -\int_0^H \dot{\epsilon} dy \quad (4.12)$$

De acordo com a equação (4.12) pode-se observar que quando $\dot{\epsilon}$ é negativo, o “slumping” é positivo. Alternativamente, de acordo com a equação (4.10):

$$\frac{d\Delta}{dt} = -\frac{dH}{dt} \quad (4.13)$$

O sinal negativo de $\left(-\frac{dH}{dt}\right)$ deve-se ao fato da variação da altura (Δ) ser na direção contrária à altura (H). Substituindo a equação (4.13) na equação (4.9):

$$\frac{dH}{dt} = \int_0^H \dot{\epsilon} dy = -\left(\frac{\rho g}{3K}\right)^m \int_0^H (H - y)^m dy \quad (4.14)$$

$$\left[\left(\frac{3K}{\rho g}\right)^m \frac{dH}{dt}\right] = -\left(\frac{H^{m+1}}{m+1}\right) \quad (4.15)$$

Logo:

$$(m + 1) \left(\frac{3K}{\rho g}\right)^m \frac{dH}{H^{m+1}} = -dt \quad (4.16)$$

$$(m + 1) \left(\frac{3K}{\rho g}\right)^m \int_{H_0}^H \frac{1}{H^{m+1}} dH = - \int_0^t dt \quad (4.17)$$

$$\frac{(m+1)}{m} \left(\frac{3k}{\rho g}\right)^m \left[\left(\frac{1}{H^m}\right) - \left(\frac{1}{H_0^m}\right) \right] = t \quad (4.18)$$

$$\frac{1}{H^m} - \frac{1}{H_0^m} = \left(\frac{m}{m+1}\right) \left(\frac{\rho g}{3K}\right)^m t \quad (4.19)$$

$$\frac{H}{H_0} = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{m}{m+1}\right) \left(\frac{\rho g H_0}{3K}\right)^m t} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.20)$$

Através de experimentos serão determinados os valores de m e k . Foi utilizado a ferramenta solver function, do programa Excel, que considera o valor ideal de uma célula alvo, alterando valores nas células utilizadas para calcular a célula-alvo, aplicando os valores da variação da altura relacionada ao tempo na equação (4.20), obtemos os valores de k e m .

5 Metodologia Experimental

5.1 Introdução

A parte experimental deste trabalho foi realizada no laboratório de Biomecânica na Faculdade de Odontologia no departamento de Ciências Restaurativas da Universidade de Minnesota (*Minnesota Dental Research Center for Biomaterials and Biomechanics-MDRCB*) na cidade de Minneapolis-MN nos Estados Unidos no período de Janeiro de 2015 a Dezembro de 2015.

O experimento foi desenvolvido e realizado sob a orientação do Professor e chefe do departamento, Alex Siu-Lun Fok, que desenvolveu a equação (4.20), que é baseada na reologia dos fluidos, descrita anteriormente, para quantificar o “slumping” em resinas odontológicas. O “slumping” é bem conhecido na engenharia para medir a deformação do concreto, mas na área de materiais odontológicos é um assunto novo. Ele tem um projeto para avaliar todas as características de ‘Handleability’ que são as características de manuseio das resinas odontológicas. As características incluem a pegajosidade, a fluidez, o “slumping” e o espalhamento das resinas odontológicas. Neste trabalho será avaliado o “slumping”.

A metodologia do experimento foi desenvolvida, com o auxílio dos membros do departamento. Por se tratar de um assunto novo não existem muitos dados a respeito na literatura. Como seria um trabalho para validar a equação criada para o “slumping” o experimento teve que se adequar à equação.

Primeiramente, tentou-se desenvolver uma equação em que se considerava a resina com um comportamento Newtoniano, o que não funcionou. Depois, a equação foi desenvolvida considerando a resina como um material Não-Newtoniano, produzindo assim resultados mais adequados. Pensou-se em aumentar a carga, pois a carga aplicada era somente a da gravidade. Tentou-se então colocar um peso de metal na forma de cone com 2mm de altura na parte superior do cone de resina, para aumentar a carga, desta vez foi inviável a inclusão do peso na equação. Então finalmente testaram-se resinas que apresentavam um “slumping” mais significativo para então aplicar os resultados na equação. Assim feito, duas resinas foram escolhidas para poder validar a equação. Os valores encontrados mostraram ser coerentes com o comportamento Não-Newtoniano, como esperado.

5.2 *Preparações dos modelos para o teste*

Duas resinas compostas diferentes foram selecionadas para este estudo. A escolha das resinas se baseou na diferença dos valores de densidade e de fabricantes diferentes. As resinas escolhidas para o experimento deveriam apresentar “slumping”, mas não poderia ser muito fluidas para que a forma de cone pudesse ser moldada. Detalhes dos materiais se encontram na (Tabela 5.1) e (Fig.5.1). Os testes foram realizados em duas temperaturas diferentes, a 25°C para representar a média da temperatura ambiente e 37° C para representar a temperatura média corporal no ser humano.

Nome do fabricante	Densidade	Fabricante
Gradia Direct X (GDX)	0,0016 g/mm ³	GC corporation Tokyo, Japan
<i>Filtek™</i> Z250	0,0021 g/mm ³	3M ESPE, Dental Products St. Paul, Minnesota USA

Tabela 5.1- Informações fornecidas pelos fabricantes das resinas.



Figura 5.1- Resinas odontológicas utilizadas no experimento.

Para que a equação sobre o “slumping” fosse validada o experimento deveria ser feito com as amostras de resina na forma de cone, pois a equação se baseou no volume de um cone. O formato de cone foi escolhido por ser uma forma que se aproxima da forma de uma cúspide.

Foi um desafio desenvolver um equipamento que pudesse reproduzir a forma de um cone em uma resina composta antes da fotopolimerização.

Devido as suas características físicas, conseguir um cone perfeito sem que ele aderisse no equipamento, foi necessário testar vários materiais para lubrificar o equipamento. Foram testados vaselina, pó de silício e finalmente o sabão líquido que funcionou muito bem.

Depois que foi possível reproduzir a forma do cone várias vezes, o próximo passo seria filmar os primeiros segundos do “slumping”, para que isso fosse possível, a câmera já deveria estar em funcionamento para captar os primeiros momentos do “slumping” e dessa forma conseguir os resultados que formassem a curva da altura versus tempo. Foram reproduzidos vários filmes até que o tempo de captação fosse ideal. Começou produzindo filmes de 15 minutos, depois percebeu que não seria necessário todo esse tempo e que 4 minutos seriam suficientes para conseguir os dados necessários para formar a curva e apresentar um platô no gráfico. E finalmente percebeu-se que o “slumping” significativo para o experimento acontecia entre trinta e cinco (35) e quarenta e cinco (45) segundos (Fig. 5.2).

Os filmes foram produzidos em uma caixa isolante térmica com controle da temperatura (Figs. 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7).

A temperatura é um componente determinante no comportamento reológico das resinas odontológicas responsável pela variação da viscosidade do material. Por isso a importância do controle deste componente. A luz usada foi amarela, pois o comprimento de onda desta não interfere na fotopolimerização da resina odontológica. Os tubos de resina usados no experimento eram mantidos dentro da caixa para que mantivessem a mesma temperatura durante todo o experimento.

A resina foi colocada em um molde confeccionado especialmente para este experimento com um formato de cone com 5,4 mm de altura e 6,3 mm de diâmetro na base. O molde foi lubrificado com sabão neutro líquido para facilitar a remoção da resina com uma forma adequada do cone. Depois de preencher o molde com a resina este foi colocado sobre uma plataforma e posicionado de forma que pudesse obter imagens de qualidade. A caixa possuía um dispositivo para poder desenformar o cone sem precisar abrir a caixa para que não houvesse variação de temperatura durante a filmagem.

A câmera utilizada para a obtenção das imagens foi a: Grasshopper GRAS-2 ϕ S4C. O programa usado para a captação das imagens foi o: Point Grey Fly Cap 2. A resolução das imagens é de: 1600 x 1200 na frequência de 1,00 Hz.

Depois que os filmes foram reproduzidos adequadamente, outro programa foi utilizado para medir as alturas, o ImageJ que é um software livre (freeware) que pode ser obtido

gratuitamente no site <http://rsb.info.nih.gov/ij/>. Esse software é usado para análise de imagens, tanto de fotos quanto de vídeos. Possui várias ferramentas que podem ter utilidade em diversas áreas de conhecimento.

Foram feitas medidas a cada um segundo, da parte mais alta do cone até a sua base, em cinco cones de cada resina, nas duas temperaturas, totalizando 20 cones.

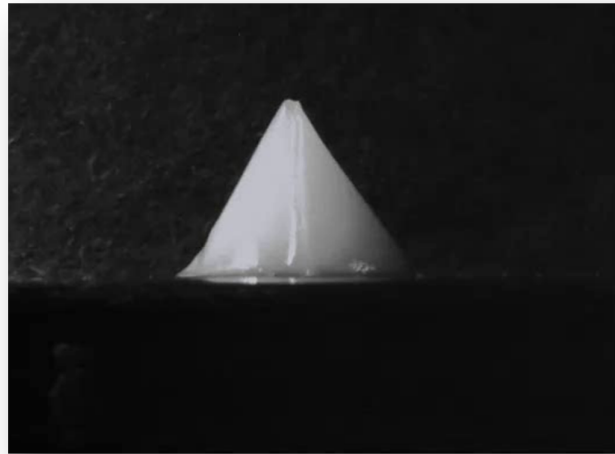


Figura 5.2- Imagem do filme produzido pela câmera digital dentro da caixa com controle de temperatura.

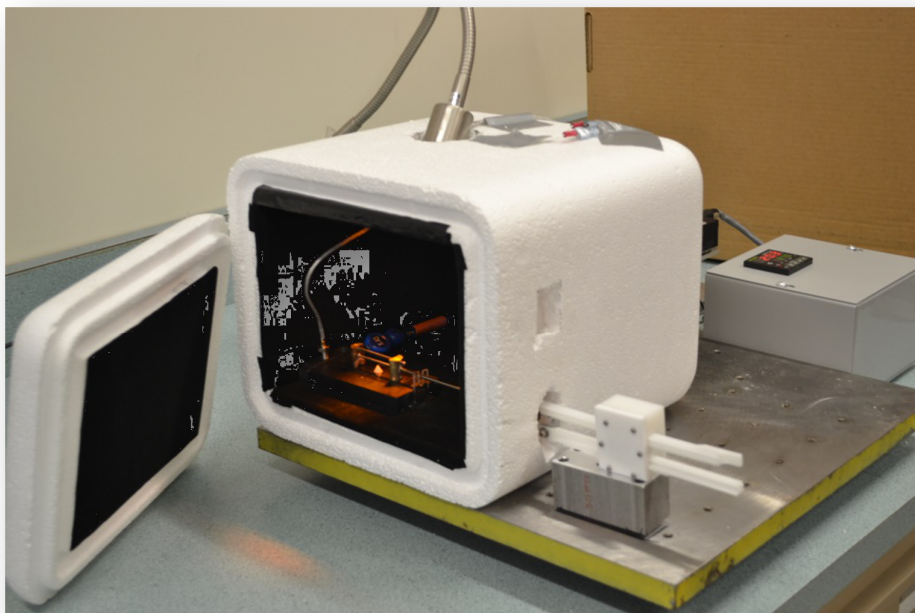


Figura 5.3-Caixa térmica com controle de temperatura desenvolvida no laboratório da Universidade de Minnesota.

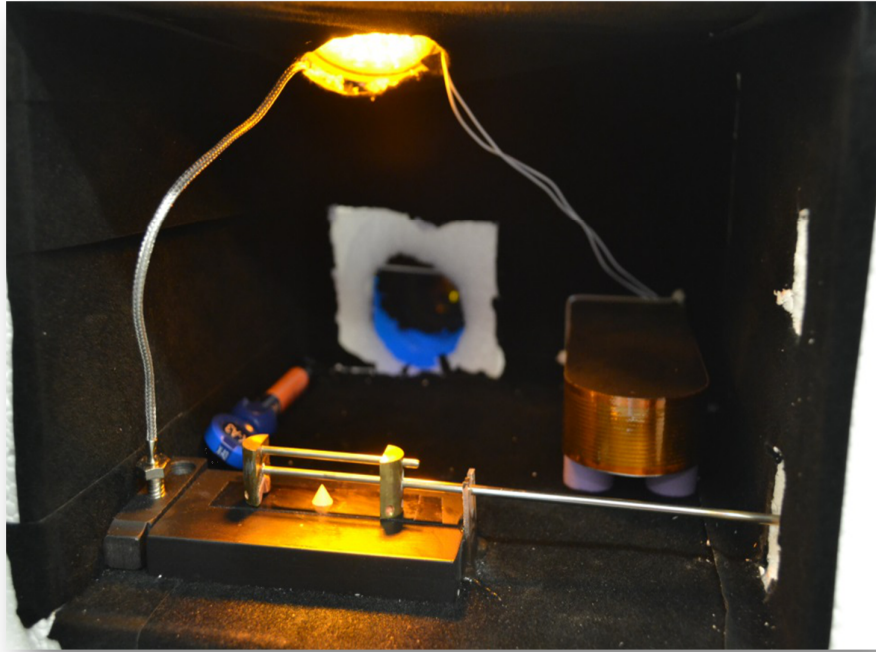


Figura 5.4- Foi utilizada uma luz amarela, cujo comprimento de onda de 570 – 590 nm não interfere nas propriedades da resina e ao mesmo tempo proporciona iluminação suficiente para uma boa imagem durante as filmagens.

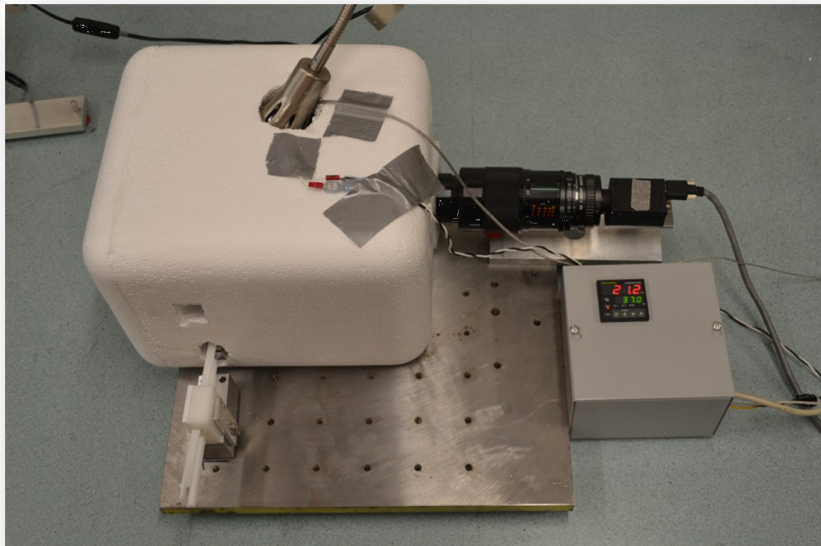


Figura 5.5- Câmera digital acoplada à caixa térmica e o termostato mostrando em verde a temperatura a ser alcançada e em vermelho a temperatura do momento.

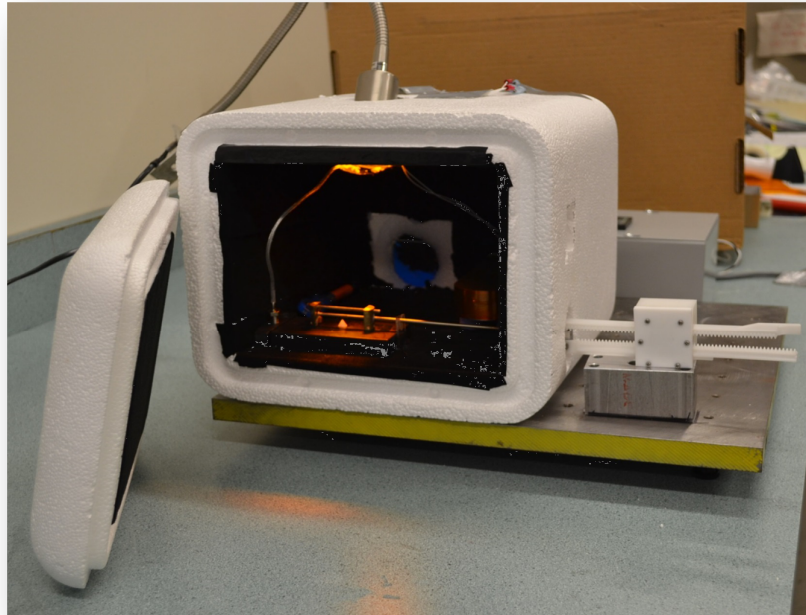


Figura 5.6- Dispositivo para moldagem do cone com acionamento fora da caixa para evitar abertura da caixa e consequentemente causar variação na temperatura do sistema.

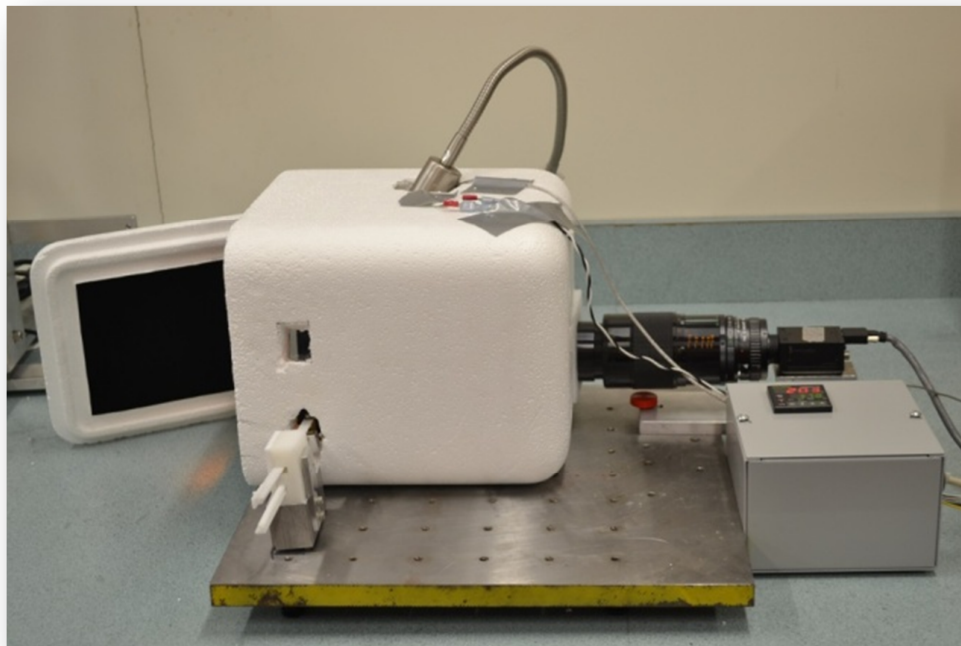


Figura 5.7- Abertura na lateral da caixa coberta com vidro para poder visualizar o posicionamento do cone durante as filmagens do “slumping”.

5.3 *Análises dos dados*

Foram feitos filmes com a duração de 40 segundos utilizando a caixa isolante com controle de temperatura. Os filmes foram transferidos para o programa ImageJ e foram feitas medidas a cada um segundo durante quarenta segundos. As medidas foram feitas em quatro grupos de cinco cones, sendo eles: Z250 com temperatura de 25°C (Graf.6.1), Z250 com temperatura de 37°C (Graf.6.2), GDX com temperatura de 25°C (Graf.6.3) e GDX com temperatura de 37°C (Graf.6.4). Após a obtenção dos dados de cada grupo de cones, como pode ser visualizado no exemplo de um grupo na (Tabela 5.2), plotagens foram feitas para visualização da curva no gráfico de variação da altura com o tempo. A visualização do gráfico é importante para observar o formato da curva uniforme até a obtenção de um platô. Com esses dados foi possível aplicá-los na plataforma do Excel e com a utilização do “Solver Function”, que é uma ferramenta do Excel que procura os melhores valores das variáveis dentro de uma equação, foi possível obter os valores para m e k dentro da equação.

Tempo (Seg.)	Cone 1	Cone2	Cone 3	Cone 4	Cone 5
0	5.488	5.5	5.5	5.5	5.488
1	5.426	5.426	5.423	5.425	5.367
2	5.401	5.377	5.309	5.375	5.33
3	5.352	5.34	5.258	5.338	5.258
4	5.34	5.316	5.219	5.325	5.197
5	5.315	5.291	5.206	5.263	5.161
6	5.303	5.267	5.194	5.251	5.137
7	5.266	5.242	5.143	5.226	5.088
8	5.253	5.218	5.13	5.213	5.04
9	5.229	5.205	5.104	5.188	5.028
10	5.216	5.181	5.092	5.176	5.015
11	5.192	5.169	5.053	5.151	4.991
12	5.192	5.144	5.053	5.126	4.979
13	5.179	5.144	5.028	5.113	4.955
14	5.167	5.119	5.015	5.088	4.943
15	5.142	5.107	5.002	5.088	4.931
16	5.142	5.095	4.977	5.076	4.906
17	5.142	5.083	4.964	5.051	4.906
18	5.13	5.083	4.951	5.039	4.906
19	5.13	5.083	4.926	5.026	4.882
20	5.093	5.058	4.926	5.026	4.882
21	5.093	5.058	4.926	5.026	4.882
22	5.093	5.046	4.926	4.989	4.882
23	5.081	5.033	4.913	4.989	4.882
24	5.081	5.033	4.913	4.989	4.882
25	5.081	5.033	4.9	4.989	4.882
26	5.081	5.009	4.9	4.989	4.882
27	5.081	5.009	4.875	4.976	4.882
28	5.081	4.997	4.875	4.976	4.882
29	5.081	4.984	4.875	4.951	4.882
30	5.081	4.984	4.875	4.951	4.882
31	5.068	4.984	4.875	4.951	4.882
32	5.068	4.984	4.875	4.951	4.858
33	5.068	4.96	4.875	4.951	4.858
34	5.068	4.96	4.875	4.951	4.858
35	5.056	4.96	4.875	4.951	4.858
36	5.056	4.96	4.875	4.926	4.858
37	5.056	4.96	4.875	4.926	4.858
38	5.056	4.96	4.875	4.926	4.858
39	5.056	4.96	4.875	4.926	4.858
40	5.056	4.948	4.875	4.926	4.858

Tabela 5.2 - Exemplo de um grupo de dados obtidos pela medição da variação da altura do cone durante 40 segundos.

6 Resultados e Discussão

Depois que foram feitas as medidas das alturas do cone utilizando o programa ImageJ foi possível plotar os gráficos e analisar se o tempo de “slumping” era suficiente para visualizar uma curva com platô.

Comparando a figura 6.1 com a figura 6.2, observa-se que o “slumping” acontece mais rápido na temperatura de 37°C do que a 25°C. A viscosidade aumenta quando a temperatura aumenta.

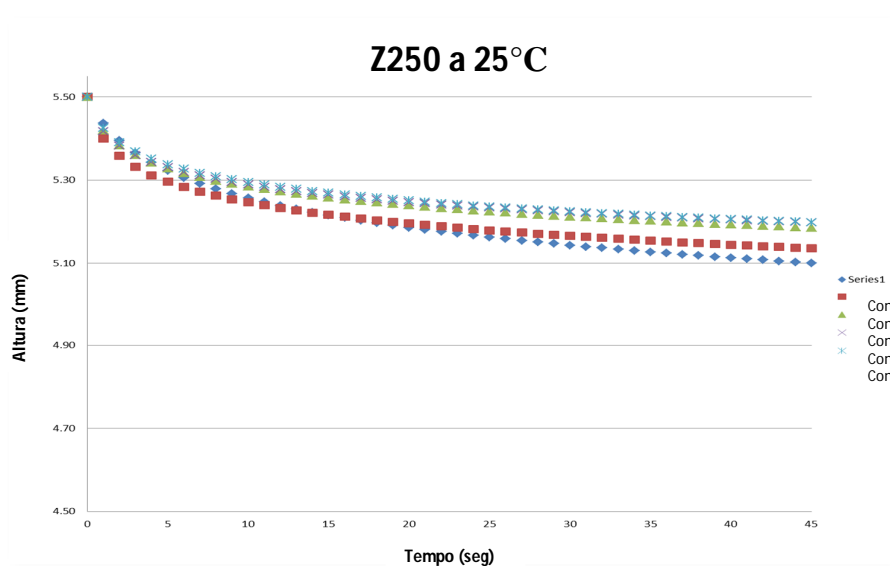


Figura 6.1 - Gráfico do “tempo x variação da altura” da resina Z250 com temperatura de 25°C.

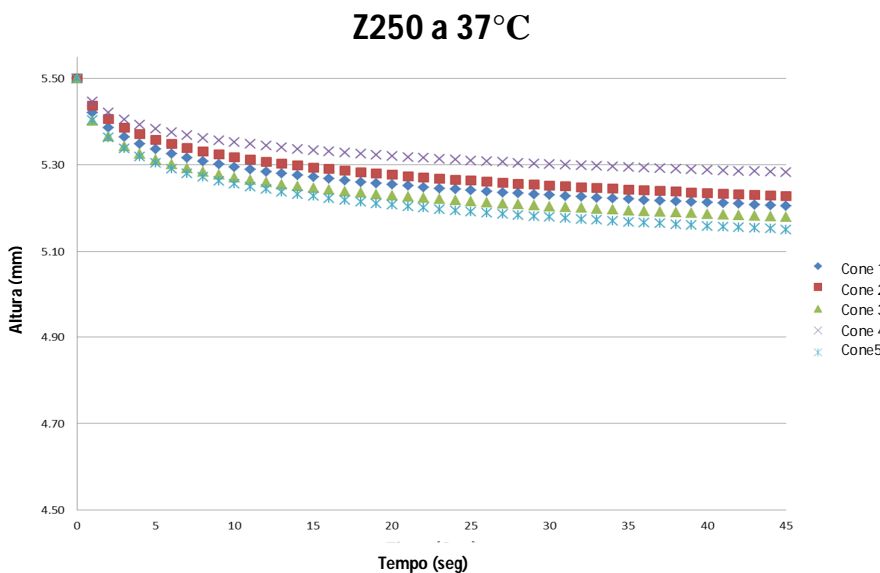


Figura 6.2 - Gráfico do “tempo x variação da altura” da resina Z250 com temperatura de 37°C.

Pode-se observar que nas figuras 6.3 e 6.4 referentes à resina GDX o “slumping” é bem maior quando comparado com as figuras 6.1 e 6.2 referentes à resina Z250.

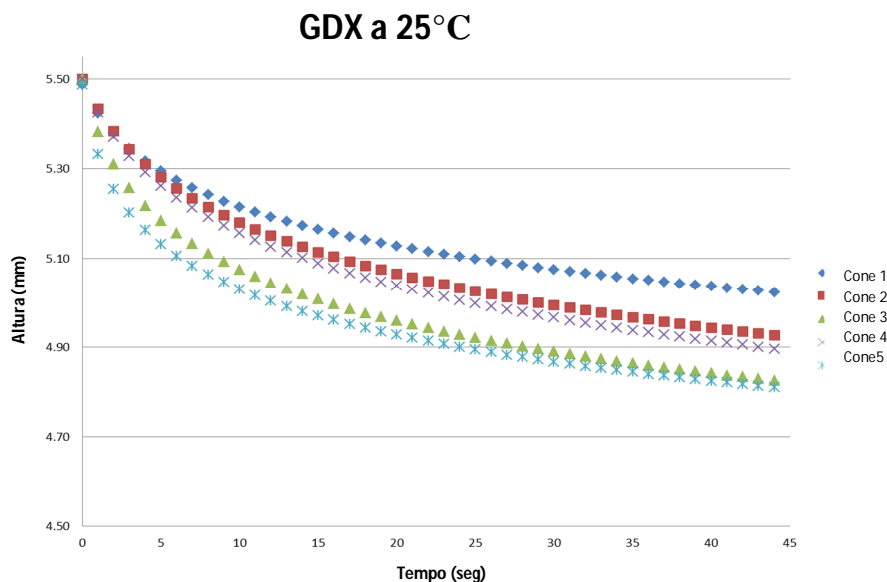


Gráfico 6.3 - Gráfico do “tempo x variação da altura” da resina GDX com temperatura de 25°C.

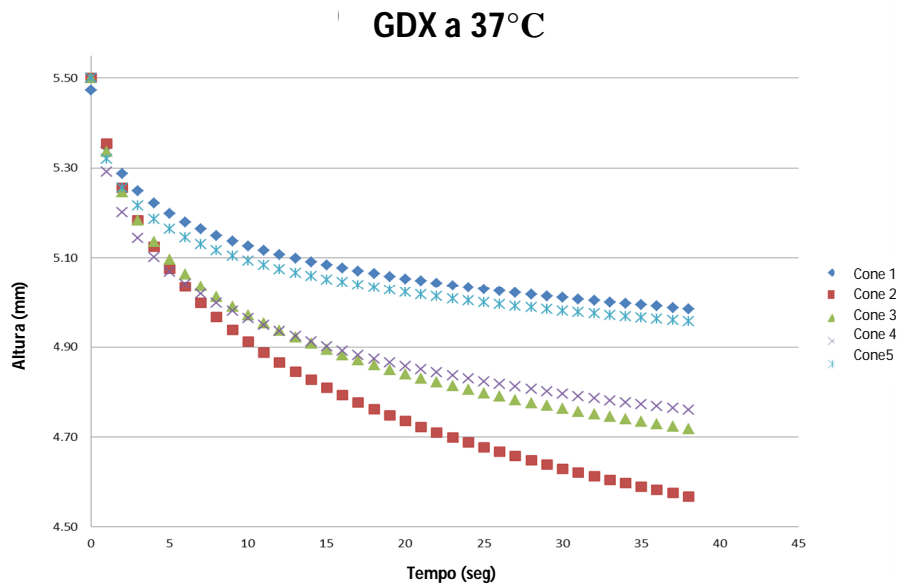


Figura 6.4 - Gráfico do “tempo x variação da altura” da resina GDX com temperatura de 37°C.

Com os valores obtidos pelas filmagens da altura (H), do tempo (t), dos valores das respectivas densidades de cada resina fornecida pelo fabricante (ρ) e o valor da força da gravidade (g), todos aplicados na equação:

$$\frac{H}{H_0} = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{m}{m+1}\right) \left(\frac{\rho g H_0}{3k}\right)^m t} \right]^{\frac{1}{m}}$$

Utilizando o programa Excel foram encontrados os valores de m e de k de cada cone, com esses valores obteve-se uma media de cada grupo de resina nas diferentes temperaturas. Os valores de m e de k de cada grupo podem ser visualizados nas tabelas abaixo:

Z250 a 25°C	Cone 1	Cone 2	Cone 3	Cone 4	Cone 5	Média	Desvio Padrão
m	46,51	69,46	77,78	84,48	79,73	72	15
$k(\text{Pa}\cdot\text{s}^{1/m})$	37,98	37,21	37,36	37,30	37,40	37,45	0,30

Tabela 6.1- Valores de m e k de cinco amostras da resina Z250 a 25°C.

Z250 a 37°C	Cone 1	Cone 2	Cone 3	Cone 4	Cone 5	Média	Desvio Padrão
m	86,23	85,11	84,69	112,18	72,88	88	14
$k(\text{Pa}\cdot\text{s}^{1/m})$	37,32	37,52	37,17	37,49	37,22	37,35	0,16

Tabela 6.2 - Valores de m e k de cinco amostras de resina Z250 a 37°C.

GDX a 25° C	Cone 1	Cone 2	Cone 3	Cone 4	Cone 5	Média	Desvio Padrão
m	36,26	25,97	27,65	25,54	31,92	29	5
$k(\text{Pa}\cdot\text{s}^{1/m})$	29,62	30,34	29,23	0,16	28,54	29,58	0,73

Tabela 6.3- Valores de m e k de cinco amostras de resina GDX a 25°C.

GDX a 37° C	Cone 1	Cone 2	Cone 3	Cone 4	Cone 5	Média	Desvio Padrão
m	46,25	16,82	24,41	31,10	48,33	33	14
$k(\text{Pa}\cdot\text{s}^{1/m})$	28,62	30,21	29,05	28,38	28,36	28,92	0,77

Tabela 6.4 - Valores de m e k de cinco amostras de resina GDX a 37°C.

Com os valores de “ m ” e “ k ” definidos pela equação: $\frac{H}{H_0} = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{m}{m+1}\right) \left(\frac{\rho g H_0}{3K}\right)^m t} \right]^{\frac{1}{m}}$, pode-se então

aplicá-los na equação de tensão: $\sigma = K \cdot \epsilon^{\frac{1}{m}}$.

Após a obtenção dos valores da tensão e da deformação, plota-se o gráfico de “tensão x taxa de deformação” e a curva que se forma é a que se esperava de um material com comportamento Não-Newtoniano.

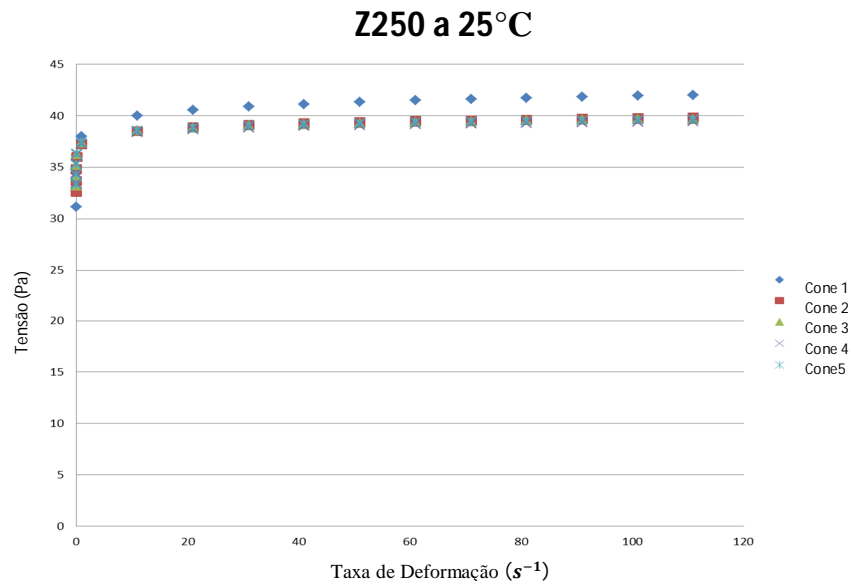


Figura 6.5 - Gráfico de “Tensão (Pa)x Taxa de Deformação(s^{-1})” da resina Z250 a 25°C.

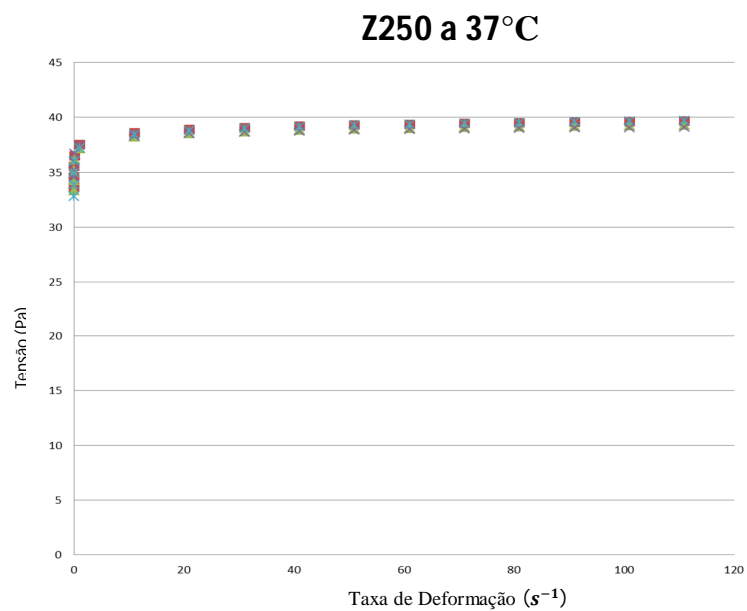


Figura 6.6- Gráfico de “Tensão (Pa) x Taxa de Deformação (s^{-1})” da resina Z250 a 37°C.

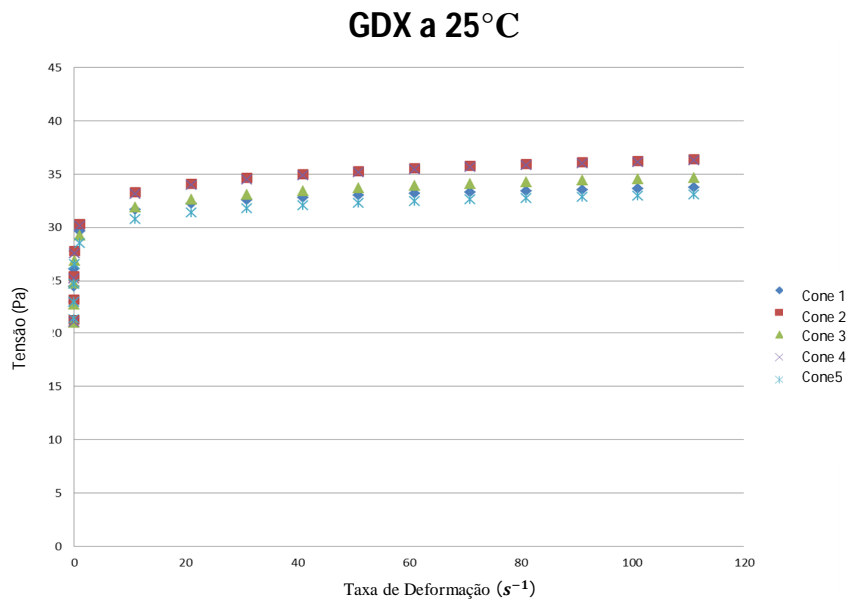


Figura 6.7 - Gráfico de “Tensão (Pa) x Taxa de Deformação (s^{-1})” da resina GDX à 25°C.

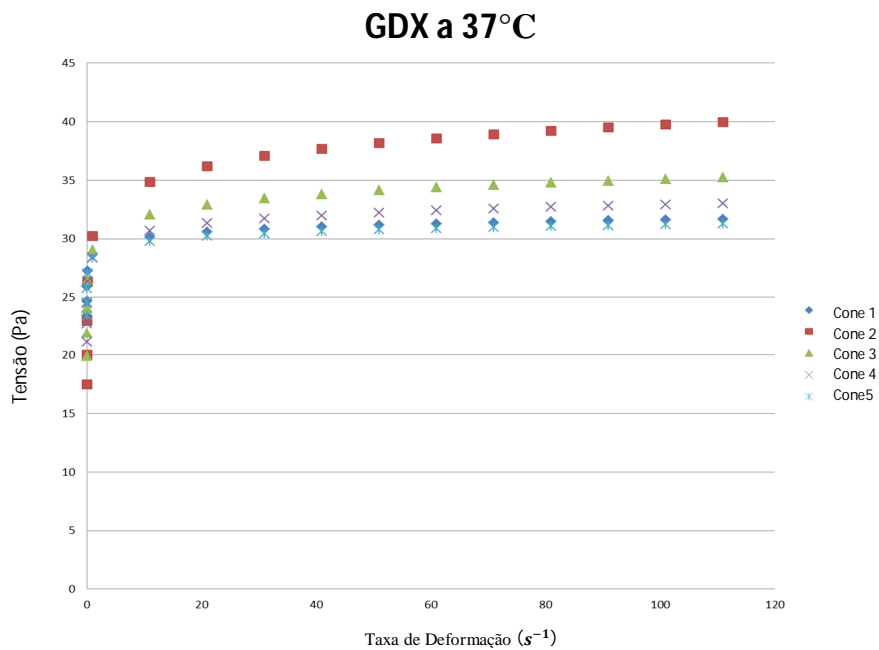


Figura 6.8 - Gráfico de “Tensão (Pa) x Taxa de Deformação (s^{-1})” da resina GDX a 37°C.

Observou-se neste experimento que a resina Z250 apresenta um menor slumping comparada com a GDX e que as diferentes temperaturas não tiveram grande influência nas resinas. A média para os valores de m da resina Z250 a 25°C foi 72 e a 37°C foi 88, esperava-se que fosse menor o valor de m na temperatura mais alta, mas não foi o que ocorreu na resina Z250 devido a outros fatores como tamanho de partícula, forma da partícula e composição da matriz, os quais não são os principais objetivos desta pesquisa. Para a resina GDX a média dos valores de m mostrou evidente diferença comparado com os da resina Z250. A média de m para a resina GDX a 25°C foi de 29 e a 37°C foi 33 sendo menores do que os apresentados na resina Z250. Novamente a diferença de temperatura não foi significativa e m apresentou um pouco maior na temperatura mais alta. Os valores de k para a resina Z250 foram de 37.45 (Pa.s^{1/m}) e 37.35 k (Pa.s^{1/m}) para as temperaturas de 25°C e 37°C respectivamente. E para a resina GDX foram de 29.58 k (Pa.s^{1/m}) e 28.92 k (Pa.s^{1/m}) para 25°C e 37°C respectivamente. Observa-se que quanto maior o “slumping” menores são os valores para m e de k .

A solução analítica para o “slumping” foi desenvolvida e testada com sucesso neste estudo para derivar parâmetros reológicos de resinas odontológicas. Tal modelo matemático pode fornecer orientações úteis para os dentistas e cientistas de materiais para selecionar ou desenvolver resinas odontológicas com comportamentos de “slumping” apropriados. Este estudo se mostra de extrema valia, pois até o presente momento não existe uma quantificação do “slumping”, sendo este uma das características de manuseio das resinas odontológicas. O termo “slumping” ainda não é comum na linguagem dos dentistas, na prática dos dentistas se sabe que uma resina é mais “mole” que a outra ou mais viscosa que a outra, não se sabia o termo para esta característica de manuseio e muito menos a quantificação desta.

A quantificação do “slumping” proporcionará uma comunicação eficiente entre os fabricantes e os dentistas, que é fundamental para uma indicação segura de uma resina odontológica para cada caso clínico.

7 Conclusões

Com os resultados obtidos nesse trabalho podemos concluir que a equação desenvolvida para quantificar o “slumping” mostrou-se adequada e eficiente ao que se propôs. Através dos valores de m e de k será possível montar uma tabela comparativa do “slumping” das resinas compostas odontológicas e dessa forma facilitará a comunicação entre o fabricante e os dentistas.

A forma de cone escolhida para a moldagem dos corpos de prova se mostrou adequada para a análise do movimento de “slumping”, conseguimos confeccionar moldes que funcionaram bem na produção dos cones de resina. Esse método de confecção de cones se adequa para resinas que mantêm a forma, não funciona para resinas flow por exemplo.

Como o objetivo era a validação da equação, escolhemos resinas com diferentes densidades para que houvesse uma comparação. As resinas escolhidas mostraram diferentes comportamentos mecânicos como era esperado. A resina com menor “slumping” testada foi a Z250 que apresentou valores mais altos para m e k quando comparados à resina com maior “slumping” a GDX também testada. Esses valores mostraram coerência em relação aos dados obtidos com os experimentos e aplicados na equação.

O uso de filmagens para obtenção dos dados se mostrou eficiente pela qualidade das filmagens. Com o auxílio do software “ImageJ” pôde-se colher dados com segurança de calibragem dos corpos de prova.

Observou-se durante os experimentos a importância de manter a temperatura e a umidade do ambiente durante a coleta dos dados, por isso surgiu a necessidade da confecção de uma caixa com controle de temperatura. A caixa foi construída e o experimento pôde transcorrer sem variações térmicas, que foi de extrema valia para a acuidade dos dados a serem comparados entre as diferentes resinas.

A utilização do Excel ajudou na obtenção dos valores de m e k ajustando os dados obtidos pelo experimento à equação proposta o que tornou possível a plotagem dos gráficos e a comprovação da validade da fórmula em quantificar o “slumping” em diferentes resinas compostas odontológicas.

Esse trabalho mostrou a possibilidade da quantificação de propriedades de manuseio de resinas odontológicas através de modelos matemáticos. Até o momento não havia uma quantificação das características de manuseio das resinas, o que facilitará a comunicação entre os fabricantes e os dentistas.

8 Referências Bibliográficas

- [1] M.J. Tyas, D.W. Jones, A.S. Rizkalla. The evaluation of resin composite consistency. *Dent Mater*, 14 (1998), pp. 424–428.
- [2] G. Willems, P. Lambrechts, M. Braem, J.P. Celis, G. Vanherle. A classification of dental composites according to their morphological and mechanical characteristics. *Dent Mater*, 8 (1992), pp. 310-319.
- [3] I.B. Lee, H.H. Son, C.M. Um. Rheologic properties of flowable, conventional hybrid, and condensable composite resins. *Dent Mater*, 19 (2003), pp. 298-307.
- [4] K.A. Al-Sharaa, D.C. Watts. Stickiness prior to setting of some light cured resin composites. *Dent Mater*, 19 (2003), pp. 182–187.
- [5] D.F. Taylor, S.K. Kalachandra, M. Sankarapandian, J.E. McGrath. Relationship between filler and matrix resin characteristics and the properties of uncured composite pastes. *Biomaterials*, 19 (1998), pp. 197–204.
- [6] I.B. Lee, B.H. Cho, H.H. Son, C.M. Um. Rheological characterization of composites using a vertical oscillation rheometer. *Dent Mater*, 23 (2006), pp. 425–432.
- [7] J.H. Lee, C.M. Um, I.B. Lee. Rheological properties of resin composites according to variations in monomer and filler composition. *Dent Mater*, 22 (2006), pp. 515–526.
- [8] S.A. Ahdal, N. Silikas, D. C. Watts. Rheological properties of resin composites according to variations in composition and temperature. *Dental Mater*, 30 (2014), pp. 517-524.
- [9] Y.C. Chiang, A. Knezevic, K.H. Kunzelmann. Slumping during sculpturing of composite materials. *Dent Mater*, 24 (2008), pp.1594-1601.
- [10] I.B. Lee, J. Chang, J. Ferracane. Slumping resistance and viscoelasticity prior to setting of dental composites. *Dent. Mater.*, 24 (2008), pp. 1586–1593.
- [11] I.B. Lee, S.H. Min, S.Y. Kim, J.Ferracane. Slumping tendency and rheological properties of flowable composites. *Dent Mater*, 26 (2010), pp. 443-448.
- [12] MONDELLI, J. et al. *Procedimentos pré-clínicos*. São Paulo: Editorial Premier, 1998.
- [13] Machado, José Carlos V. *Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo*/José Carlos V. Machado – Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2002.

Anexo 1

UNIVERSITY OF MINNESOTA*Twin Cities Campus**Minnesota Dental Research Center for
Biomaterials and Biomechanics**School of Dentistry**16-212 Moos Health Science Tower
515 Delaware Street S.E.
Minneapolis, MN 55455**Office: 612-625-0950
Fax: 612-626-1484*

September 8, 2014

To Whom It May Concern:

It gives me great pleasure to extend an invitation to **Ms. Elissa Talma** to participate in a research program from January 1, 2015 to December 31, 2015 in the Minnesota Dental Research Center for Biomaterials and Biomechanics (MDRCBB) at the University of Minnesota. This will be a joint research program between the MDRCBB and the Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil, where Ms. Talma is currently a graduate student in Structure Engineering. I have reviewed her proposal and I accept her request to conduct her research project in the MDRCBB. Her research project is entitled, "Experimental validation of mathematic models in shrinkage stress development in dental composites."

The MDRCBB has expertise in evaluating the mechanical performance of dental restorations using clinically relevant laboratory tests. We have many years of close working relationships with major manufacturers of dental products. We are also a leader in using sophisticated numerical models to perform biomechanical analysis for dental restorations and treatment procedures. I believe this experience will help prepare Ms. Talma for a successful career in the emerging areas of biomaterials and the biomechanics of dental restoratives. Through our correspondence, I find her standard of English to be good and should meet our language requirement for research purposes. I therefore strongly recommend her for a state scholarship.

During her visit to Minnesota, Ms. Talma will not be required to pay any tuition fees as she will be working as a visiting Masters student. Should you require further information on the MDRCBB or the proposed research program, please do not hesitate to let me know.

Yours faithfully,



Alex Fok, BEng, PhD, CEng
Professor and Director
MN Dental Research Center
for Biomaterials and Biomechanics

cc: Ralph DeLong, Chair

Anexo 2

UNIVERSITY OF MINNESOTA*Twin Cities Campus**Minnesota Dental Research Center for
Biomaterials and Biomechanics**School of Dentistry**16-212 Moot Health Science Tower
515 Delaware Street S.E.
Minneapolis, MN 55455**Office: 612-625-0950
Fax: 612-626-1484*

December 23, 2015

To Whom It May Concern:

This is to confirm that **Elissa Talma**, a post-graduate student from the Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil, has successfully conducted biomechanical researches on the rheology and handling properties of dental composites as part of her Master program. The research was performed at the Minnesota Dental Research Center for Biomechanics and Biomaterials, University of Minnesota School of Dentistry, USA during the period from January to December, 2015.

Elissa Talma has performed the following analyses:

- Slumping behavior in dental composite

Her research has provided important results in the quantification of the handling properties of dental composites and the validation of an analytical solution for the slumping in such materials.

Faithfully Yours,



Alex Siu-Lun Fok, PhD

Director, Professor

Minnesota Dental Research Center
for Biomaterials and Biomechanics
University of Minnesota

Tel: +001 612 625 5406; Fax: +001 612 626 1484

Email: alexfok@umn.edu

Anexo 3

UNIVERSITY OF MINNESOTA

Twin Cities Campus

Minnesota Dental Research Center for
Biomaterials and Biomechanics
School of Dentistry

16-212 Moos Health Science Tower
515 Delaware Street S.E.
Minneapolis, MN 55455
Office: 612-625-0950
Fax: 612-626-1484

April 7, 2016

Prof. Max de Castro Magalhaes, PhD
Department of Structural Engineering
School of Engineering, Federal University of Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha
Belo Horizonte – MG, CEP 31270-901, Brazil
Tel: +55(31) 3409-1846
Email: max@dees.ufmg.br

Dear Prof. Magalhaes,

I am writing to accept your invitation to act as co-supervisor of Elissa Talma for her M.Sc. study in Structural Engineering at the Federal University of Minas Gerais, with a research project on characterizing the handling properties of dental composite resins. This is also to confirm that my acceptance has been approved by the Department Head of Restorative Sciences, Dr. Scott McClanahan.

I understand that my duty will include participating in Elissa's viva, which will take place in July/August this year and can be done via video conferencing.

Thank you again for your kind invitation and I look forward to working with you and Elissa on this interesting project.

Best regards,



Alex Siu-Lun Fok, PhD
Director, Professor
Minnesota Dental Research Center
for Biomaterials and Biomechanics
University of Minnesota
Tel: +001 612 625 5406
Email: alexfok@umn.edu



Scott B McClanahan
Interim Chair
Department of Restorative Sciences
School of Dentistry
University of Minnesota
Tel: +001 612 624 9900
Email: mccla056@umn.edu