

## Papais-noéis de chocolate sob observação

### Registradores de dados em moldes de policarbonato permitem o monitoramento do processo

Para determinar esforços no processo de processamento de chocolate, o Instituto de Tecnologia de Plásticos (IKT) da Universidade de Stuttgart equipou os moldes de chocolate da Hans Brunner GmbH com registradores de dados que fornecem informações do processo de processamento e assim permitem a identificação de esforços críticos. A partir daqui, podem ser tomadas medidas de otimização para garantir uma vida útil o mais longa possível.



As figuras ou barras de chocolate são produzidas utilizando moldes nos quais, em caso de forte tensão, se podem formar rachaduras. Os registradores de dados podem ajudar a identificar parâmetros críticos no processo de fabricação © Hans Brunner GmbH

Moldes em policarbonato são submetidos a inúmeras tensões diferentes no processo de processamento de chocolate. Além das influências da temperatura devido ao enchimento do chocolate quente e a subsequente passagem por uma seção de resfriamento, também é incluída uma alta carga mecânica, que é aplicada para distribuir o chocolate no molde e para desmoldar o produto na unidade de extração. Além disso, é utilizada uma grande variedade de meios de limpeza para remover resíduos dos moldes antes de passarem pelo processo novamente.

A fim de otimizar os moldes especificamente para os sistemas dos clientes, os moldes de chocolate selecionados foram equipados com registradores de dados no projeto de pesquisa Inform. Estes registram as cargas que ocorrem na produção a fim de aplicar medidas de otimização. Deste modo se garante uma vida útil mais longa dos moldes sob as condições determinadas. Este artigo pretende mostrar quais parâmetros podem ser críticos no processo de produção e como os mesmos podem ser identificados. Com a abordagem desenvolvida, tais parâmetros podem ser eliminados sem aumentar o tempo de produção ou afetar o produto.

#### Monitoramento dos parâmetros do processo

Uma vez que os parâmetros exatos do processo de processamento de chocolate foram, até agora, em sua maioria, estabelecidos com base na experiência e não monitorados, é necessário primeiro determiná-los com a maior precisão possível.

Para este fim, é integrado um registrador de dados em moldes de diferentes fabricantes de chocolate, o que permite o registro da temperatura, umidade e aceleração em 3 eixos no processo de processamento. Dado que os moldes de chocolate são guiados lateralmente em trilhos durante a dosagem e a distribuição

do chocolate até a unidade de extração por batimento, o registrador de dados está integrado no centro, na parte inferior do molde, a fim de registrar os valores máximos de aceleração atuando sobre o molde. Isto resulta em uma grande quantidade de dados de sensores que podem ser usados para a identificação de parâmetros críticos de fabricação, bem como condições-limite para simulações.

Uma análise dos valores de temperatura e umidade do registrador de dados mostra que eles não podem representar nenhum fator de influência crítica para os moldes examinados. Uma eventual rachadura por estresse devido aos meios de limpeza também pode ser descartada para os moldes considerados, após uma análise dos meios de limpeza. Assim, a influência da ocorrência de tensões mecânicas passa a se considerar como um parâmetro crítico.

A análise dos valores de aceleração mostra que as altas cargas de choque ocorrem nos percursos vibratórios durante o processamento do chocolate. Aqui, as maiores cargas mecânicas ocorrem na direção vertical, sendo caracterizadas por uma inversão regular de sinal. Isto se deve ao fato de que o molde é estimulado para vibrar. Além da amplitude, isto também é caracterizado por sua frequência.

Como exemplo, é mostrado o curso da aceleração na direção vertical a uma frequência de amostragem de 1600 Hz no percurso vibratório do processo de fabricação Fig. 1 à esquerda. Para determinar a influência da frequência de vibração, pode ser aplicada aos valores de aceleração uma transformada de Fourier. Isto resulta diretamente em um espectro de frequência (Fig.1 à direita), que permite uma clara identificação das frequências de excitação.

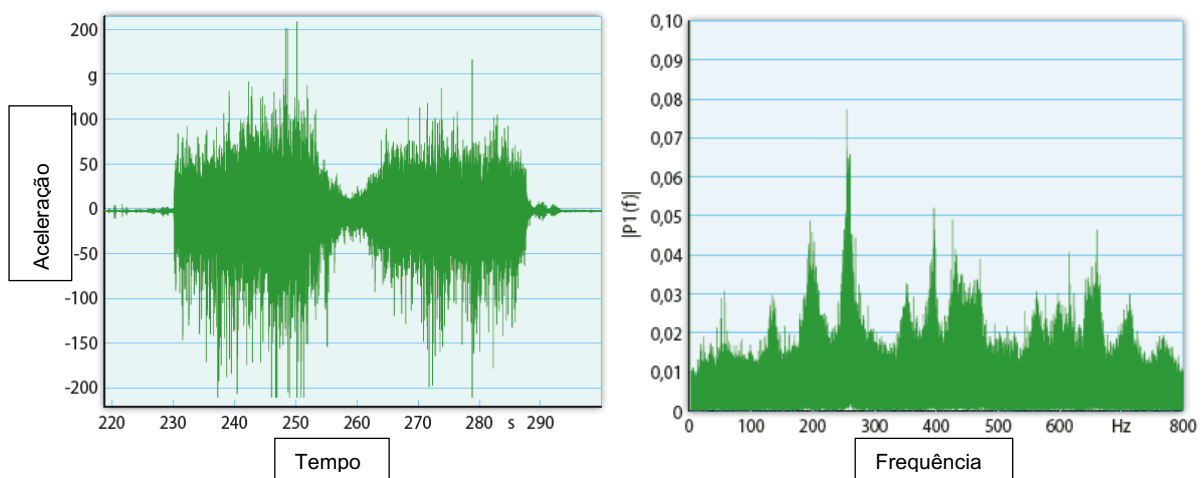


Figura 1. Valores de aceleração registrados na direção vertical (esquerda) e representação do espectro de frequência (direita)

Pode-se assim demonstrar que não existe apenas uma única frequência no processo, mas um grande número de frequências de excitação que se sobrepõem para formar uma oscilação. No entanto, são reconhecíveis picos individuais no espectro de frequência, ou seja, há frequências individuais com as quais o molde tende a oscilar mais fortemente. Como parâmetros críticos do processo, tanto a amplitude de oscilação quanto a excitação com frequências críticas de oscilação tornam-se assim o foco de novas investigações.

## Simulação

Em paralelo ao monitoramento dos parâmetros do processo, as simulações devem proporcionar uma melhor compreensão dos parâmetros críticos do processo que promovem a iniciação de rachaduras nos moldes. Primeiro de tudo, foi realizada uma análise modal para investigar se a frequência de vibração corresponde às frequências ressonantes naturais do molde. A influência da amplitude de vibração foi então analisada em uma simulação transitória da mecânica estrutural. Para ambas as simulações foi utilizado o software Ansys (Fabricante: Ansys, Inc.). A fim de permitir uma simulação dos moldes de chocolate o mais próxima possível da realidade, foram determinados experimentalmente todos os parâmetros relevantes do material, para os diferentes tipos de policarbonato utilizados. Isto inclui a determinação do módulo E e do coeficiente de contração transversal, assim como a caracterização do comportamento de amortecimento. Além disso, foram também determinados a capacidade térmica, a difusividade térmica e o coeficiente de expansão térmica. Deste modo, foi possível adaptar especialmente à aplicação o modelo de material policarbonato necessário para a simulação. Além disso, os parâmetros de simulação do ambiente resultaram diretamente dos dados registrados pelo registrador. A fim de obter uma declaração geralmente válida sobre as frequências naturais, foi construído um molde simplificado de chocolate com cinco nervuras longitudinais e onze transversais, que estão localizadas em seções equidistantes. A espessura das nervuras foi variada objetivamente de 1,5 mm a 2,5 mm e até 3,5mm. Ao determinar as frequências naturais, pode ser demonstrado que não pode ser detetada uma alta influência da espessura da nervura na respectiva posição de frequência natural (Figura 2). Ainda que seja considerada aqui uma forma simplificada

sem cavidades, poderia ser mostrado adicionalmente em outras simulações que este resultado também se aplica a moldes reais com cavidades. A influência da posição de frequência natural em uma possível falha do molde será discutida com mais detalhes na análise comparativa dos resultados que se seguirá. A fim de investigar a influência da amplitude de vibração, o comportamento dos moldes foi analisado dentro da estrutura de uma simulação mecânica estrutural transitória. A deflexão do centro do molde em comparação com o estado sem deformação foi calculada para diferentes acelerações. Pode-se demonstrar que já com uma aceleração de 15 m/s<sup>2</sup> ocorre uma deflexão vertical do centro do molde de aprox. 26,5 mm. Com o aumento da espessura da nervura, diminui para 24 mm (d = 2,5 mm) e aprox. 23 mm (d = 3,5 mm), respectivamente. Isto está de acordo com as expectativas, pois a rigidez do molde pode ser aumentada através do aumento da espessura das nervuras. Este resultado também pode ser transferido para moldes reais com cavidades e será explicado com mais detalhes na análise comparativa de resultados.

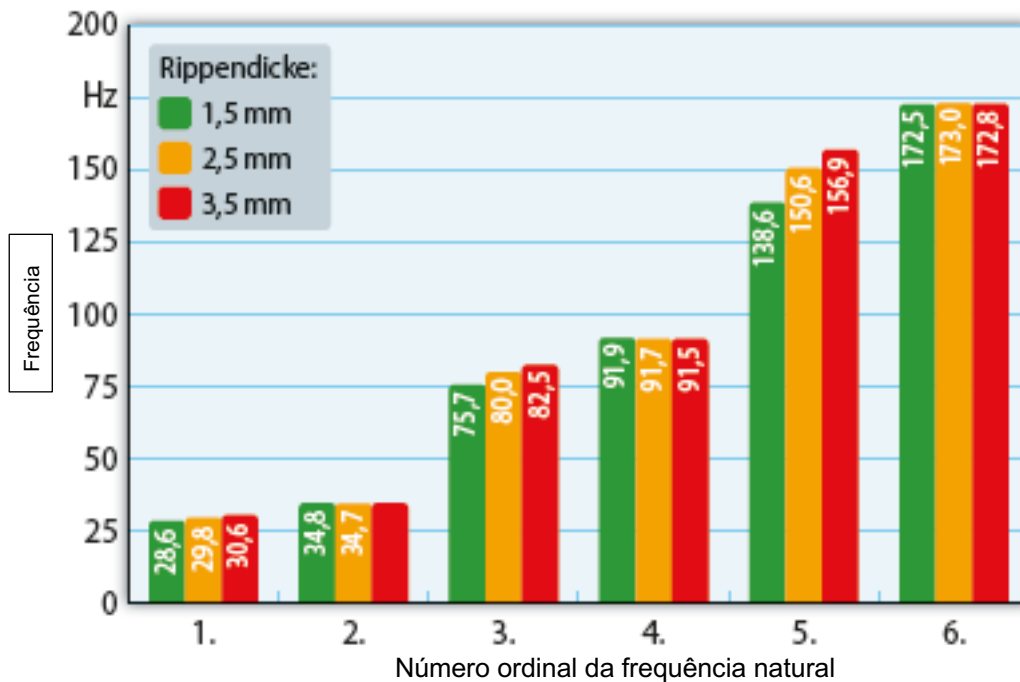


Figura 2. Representação das seis primeiras frequências naturais de um molde de chocolate com diferentes espessuras de nervuras

### Microscopia eletrônica de varredura

Para a identificação dos parâmetros críticos do processo, é necessária uma análise detalhada dos defeitos ocorridos, a fim de compreender melhor sua origem. Para este fim, foram primeiro analisados os moldes individuais de chocolate com defeito, onde foi detectada uma rachadura nas nervuras, proveniente da parte de trás do molde. Antes disso, foram realizadas simulações de moldagem por injeção para descartar a possibilidade de pontos fracos mecânicos, por exemplo, linhas de solda, estarem presentes nas posições das rachaduras. Os respectivos flancos de rachadura são preparados para exame por microscopia eletrônica de varredura a fim de obter informações sobre o mecanismo de falha. Na Figura 3 pode ser vista a área de iniciação da rachadura, bem como a direção de propagação da rachadura. A propagação da rachadura parece ser cíclica, o que é visível com base no avanço periódico da rachadura e das características estrias de fadiga. Esta progressão pode ser observada em todas as formas analisadas e é interpretada na seção seguinte, levando em conta os resultados apresentados anteriormente.

### Consolidação dos resultados

A fim de identificar parâmetros críticos do processo e assim determinar a causa da rachadura presente em moldes individuais e originada do lado posterior do molde, os resultados do registrador de dados são finalmente combinados com os resultados da simulação e as investigações do padrão de trinca por meio de microscopia eletrônica de varredura.

O monitoramento dos parâmetros do processo mostra tanto altos valores de aceleração como uma oscilação mais forte do molde com frequências individuais. Entretanto, uma vibração com uma única frequência natural crítica pode ser excluída após as primeiras otimizações experimentais do molde. Para este fim, a espessura da nervura de um molde foi aumentada em 1,2 mm. Como resultado, as taxas de falha do molde foram imensamente reduzidas.

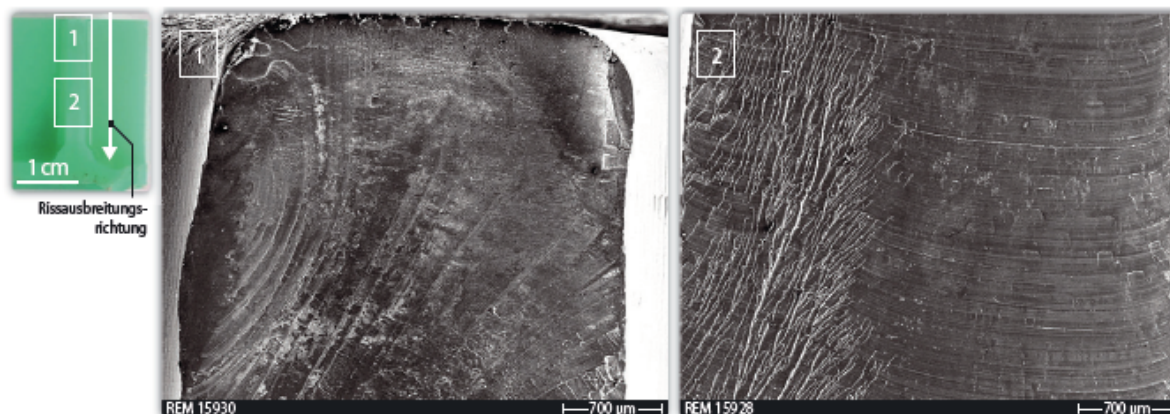


Figura 3. Rachadura completamente aberta (esquerda) com direção de propagação da rachadura e imagens MEV das posições marcadas. A iniciação da rachadura (1), bem como a propagação cíclica da rachadura podem ser reconhecidas por meio das estrias (2) Fonte: Direção de propagação da rachadura

Entretanto, como a modificação da espessura da nervura com base na análise modal realizada não levaria a nenhuma mudança significativa nas frequências naturais, é improvável que a falha se deva à excitação com uma frequência natural crítica. Assim, a rachadura pode ser devida ao aumento da amplitude de vibração. Com base na rachadura originada na parte posterior do molde, foi possível inferir antecipadamente o caso crítico de esforço, que é mostrado na Figura 4. Assim, devem ser avaliados como críticos dois possíveis locais no processo de produção de chocolate. Estes incluem uma seção vibratória para distribuição uniforme do chocolate no molde e a desmoldagem final do chocolate na unidade de extração, onde o molde é submetido a uma força por trás por um curto período de tempo e é causada uma deflexão na direção do topo do molde (verticalmente para cima; comp. Fig. 4). Neste caso, uma situação de esforço igualmente crítica poderia ser causada pela oscilação de resposta causada pelo mecanismo de deflexão.

Dado que os padrões de danos nos moldes investigados já ocorrem após tempos mais curtos, pode ser excluída uma rachadura por fadiga clássica. Com base nas micrografias eletrônicas de varredura, fica claro que a propagação da rachadura deve ocorrer na seção vibratória, uma vez que um avanço cíclico da rachadura já pode ser visto após seu início. O padrão de rachaduras é devido à abertura e fechamento associados dos flancos de rachaduras, que levam à formação de estrias de fadiga. Trata-se assim de uma rachadura por vibração, que, entretanto, já ocorre após um número menor de ciclos e é causada por uma sobrecarga na seção vibratória. Devido à propagação progressiva da rachadura, a seção transversal residual portadora de carga diminui, o que pode eventualmente causar uma rachadura forçada. Pode ser descartada a iniciação de rachaduras na unidade de extração; isso levaria a um padrão de rachadura divergente, inicialmente sem progressão cíclica, mas com uma zona de dano maior.

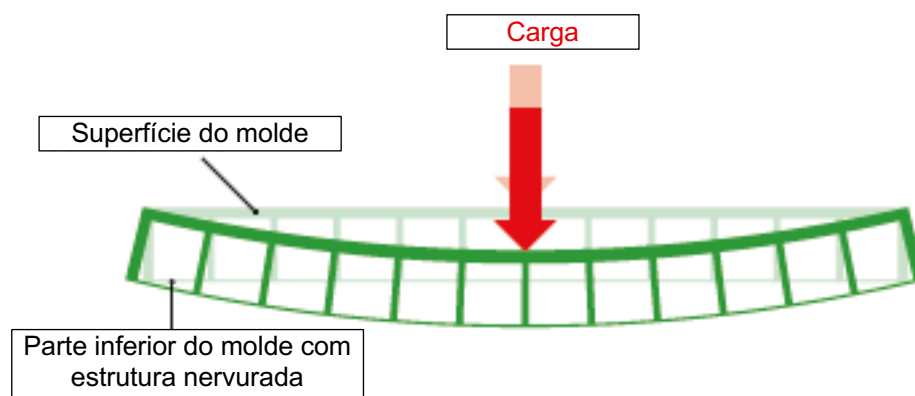


Figura 4. Representação esquemática do caso de esforço crítico para a formação de rachaduras

## Conclusão

O procedimento desenvolvido é adequado para identificar parâmetros críticos no processamento do chocolate. Não há frequências críticas de excitação, mas sim altas amplitudes de excitação nos casos de danos analisados. Com base nos dados do registrador, bem como por meio de microscopia eletrônica de varredura, a seção vibratória pôde ser identificada como um ponto crítico no processo de produção. Uma solução possível e comparativamente simples já pode ser alcançada através do aumento da espessura

das nervuras. A redução da amplitude de excitação no processo de processamento do chocolate representa outra alternativa possível. Os primeiros resultados mostram que tal pode reduzir imensamente o número de falhas e, assim, alcançar uma maior confiabilidade dos moldes. No decorrer do trabalho posterior, os registradores de dados devem ser integrados em moldes de diferentes fabricantes, a fim de obter dados estatisticamente representativos e assim poder determinar o limite de carga crítica para moldes com diferentes cavidades. A longo prazo, tal tornará possível operar um molde equipado com tecnologia de sensores através do processo de produção em vários fabricantes e assim fornecer aos clientes moldes otimizados individualmente. **W**

### Agradecimentos

O projeto de pesquisa Inform (número ZF4041124EB8) é financiado pela Federação Alemã de Associações de Pesquisa Industrial (AiF) dentro da estrutura do Programa Central de Inovação para PMEs (ZIM) do Ministério Federal de Economia e Tecnologia (BMWi).

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

