

PREVISÃO DO TEMPO DE COLAPSO DE CAIXAS DE PAPELÃO ONDULADO SOB CARGA CONSTANTE USANDO TESTE DE FLUÊNCIA DE CURTA DURAÇÃO

Ana Paula Reis

A capacidade de uma caixa de papelão ondulado em suportar o peso da coluna de embalagens colocadas sobre ela durante o empilhamento é determinada pela resistência à compressão. A resistência à compressão (RC) de uma caixa é determinada em laboratório usando-se um equipamento para teste de compressão.

A norma ASTM D642 descreve o procedimento de ensaio. O equipamento de compressão deve possuir dois pratos que comprimem a caixa a uma taxa constante de 12,7mm por minuto. Um gráfico de força versus deformação é gerado e a força máxima registrada é a resistência à compressão da caixa. A deformação correspondente a esta força é a deformação no colapso.

A norma ASTM D642 se aplica apenas para caixas novas (sem uso). Uma série de testes de empilhamento de longa duração foi realizada entre os anos 60 e 70 [2-4] para determinar a perda de resistência à compressão ao longo do tempo. Baseado nesses estudos fatores empíricos de conservação da resistência foram desenvolvidos para que os profissionais da área de embalagem usassem na avaliação do efeito da estocagem de longa duração na resistência ao empilhamento das caixas [2]. Atualmente é uma prática normal nas indústrias a determinação da resistência à compressão de caixas sob cargas de compressão de longa duração, conforme descrito abaixo:

Passo 1

É realizado o ensaio de compressão segundo a norma ATM D642. A resistência à compressão da caixa é a força máxima (libra ou newtons) registrada na curva de força versus deformação.

Passo 2

Usam-se, da literatura, os fatores de carga versus duração para encontrar o tempo de falha dado uma determinada resistência máxima. A Tabela 1 mostra dados representativos [3]. A carga é expressa como uma porcentagem da resistência obtida com aplicação ASTM D642. A Tabela 1 assume que a caixa é mantida na mesma condição climática, enquanto está sob carga como no ensaio ASTM D642.

TABELA 1. Tempo para ocorrência do colapso sob carga constante.

| Carga (% RC) | Tempo para ocorrência da falha |
|---------------------|---------------------------------------|
| 45% | 2,7 anos |
| 50% | 1 ano |
| 60% | 1 mês |
| 70% | 2 dias |
| 75% | 12 horas |
| 100% | imediatamente |

Se por exemplo uma caixa tem resistência à compressão, segundo a ASTM D642, de 500 libras (\cong 227kgf), um empilhamento de embalagens com carga de 300libras (136kgf) irá representar 60% da carga. Se esta carga de 300 libras for mantida sobre a caixa durante um longo período e sob uma condição ambiente como descrito na ASTM D642, a caixa poderá colapsar em um mês.

Mas os dados são antigos e os materiais e processos de fabricação das caixas têm apresentado um grande avanço ao longo dos anos, especialmente no que diz respeito ao uso de papel reciclado e resistência à umidade dos adesivos. Tendo isso em mente, este estudo teve dois objetivos:

1. Avaliar a precisão dos fatores de resistência remanescentes apresentados na Tabela 1.
2. Aperfeiçoar a precisão, se necessário, para complementar a norma ASTM D 642 com um teste de compressão adicional que dimensione o comportamento das caixas ao longo do tempo.

Precisão dos fatores de resistência remanescente

Com o objetivo de avaliar a precisão dos dados da Tabela 1, caixas produzidas em linha por respeitáveis fornecedores foram enviadas desmontadas e bem protegidas para os testes na Michigan State University.

Os designs das caixas eram retangulares feitos de papelão ondulado apresentando 200psi de resistência ao arrebentamento (1379kPa), onda B e onda C.

Caixa A: 500 x 380 x 300mm – abas completas, Onda B



FIGURA 1. Caixa A.

Caixa B: 500 x 330 x 250mm – abas curtas, Onda C



FIGURA 2. Caixa B.

As caixas foram montadas, condicionadas e testadas, conforme condição normalizada da ASTM a 23°C e 50%UR.

As caixas testadas eram individualmente colocadas em uma sacola plástica hermética para manter o teor de umidade durante o teste, conforme mostrado na Figura 3.



FIGURA 3. Ensaio de compressão (ASTM D642).

Os resultados da resistência à compressão, segundo a ASTM D642 e utilizando o equipamento com pratos fixos, são referentes a 5 repetições por modelo de caixa. Os resultados foram:

Caixa A: 730lb (3247N) \pm 5% - @ 7,1mm \pm 5%

Caixa B: 1240lb (5516N) \pm 3% - @12,7mm \pm 1%

A porcentagem de erro apresentado nesses resultados se refere ao desvio-padrão expresso como uma porcentagem da média.

Para checar as estimativas descritas na Tabela 1, sacos de areia e blocos de chumbo, pesando 20, 40, 60 e 80% da resistência à compressão das caixas, foram colocados sobre uma chapa de madeira posicionada sob a caixa de papelão ondulado, conforme Figura 4.



FIGURA 4. Teste de compressão de longa duração com sacos de areia e blocos de chumbo.

As caixas testadas foram colocadas em um piso forrado com plástico em uma sala com ambiente controlado. Duas replicatas foram feitas para cada combinação de caixa e carga. A condição das caixas foi monitorada inicialmente de hora em hora e depois diariamente. O tempo necessário para a ocorrência do colapso foi registrado e comparado com os tempos estimados. Os resultados na Tabela 2 mostram claramente que os dados da Tabela 1 apresentam uma durabilidade da caixa superestimada.

TABELA 2. Tempo de falha efetivo versus estimado.

| Caixa A: resistência à compressão segundo a norma ASTM D642: 730lb (3247N). | | |
|---|---------------|------------------------|
| % de carga | Tempo efetivo | Tempo estimado |
| 20% | 6 semanas+ | Nunca |
| 40% | 14 dias | Aproximadamente 3 anos |
| 60% | 2 dias | 30 dias |
| 80% | 0,5 horas | 10 horas |
| Caixa B: resistência à compressão segundo a norma ASTM D642: 1240lb (5516N). | | |
| % de carga | Tempo efetivo | Tempo estimado |
| 20% | 6 semanas | Nunca |
| 40% | 14 dias | Aproximadamente 3 anos |
| 60% | 2 dias | 30 dias |
| 80% | 0,5 horas | 10 horas |

Nova metodologia de ensaio

Uma forma de avaliar o problema com os dados da Tabela 1 é fazer os mesmos tipos de ensaios de longa duração realizados no passado para produzir uma nova referência de fatores de resistência remanescente. Isto já foi realizado e os resultados estão na Tabela 2. Mas estes dados estarão igualmente obsoletos em breve também.

A melhor solução é o desenvolvimento de um método que permita a realização da estimativa, usando apenas o teste de compressão, sem depender de dados externos para os cálculos. Como o tipo de dado que se procura é o comportamento ao longo do tempo, a norma ASTM D 642 obviamente não fornece informação suficiente (a duração do ensaio é por volta de um minuto).

A melhor solução são os testes com sacos de areia porque é um teste simples, não requer equipamento e simula melhor as condições reais de solicitação. Mas este método tem vários inconvenientes. Um deles é o manuseio da carga (acima de 450kgf) utilizada no teste. Outra desvantagem é a duração do teste (podendo chegar a vários meses). Como é provável que qualquer assunto referente ao desempenho da caixa precise do uso de um equipamento de compressão, seria preferível realizar um teste de desempenho de fluência, utilizando-se o mesmo equipamento.

Em um teste de fluência, a máquina é ajustada para aplicar uma força constante na caixa e a deformação é registrada ao longo do tempo. A duração do teste precisa ser necessariamente limitada considerando-se que o equipamento deve estar ligado o tempo todo e a idéia é fazer uma versão do ensaio de sacos de areia com curta duração. Neste estudo foi determinado que o tempo de 12 horas seria apropriado.

O teste pode ser realizado durante a noite, não requer supervisão, não ocupa o equipamento por uma quantidade não razoável de tempo útil e gera 12 horas de dados. Mas isso significava que, para baixos níveis de carga, muitas das caixas testadas não iriam colapsar durante as 12 horas de ensaio. Portanto, nesses casos, seria necessário extrapolar os dados dos testes para tempos maiores.

Depois de aplicar uma pré-carga de 50lb (222N) para acertar a posição inicial a partir da qual se irá determinar a deformação da caixa, níveis de carga iguais a 20, 40, 60 e 80% da resistência à compressão da caixa determinada segundo a norma ASTM D 642 foram aplicados para os dois modelos de caixas, utilizando o equipamento de compressão. As deformações foram periodicamente medidas pelo equipamento durante as 12 horas de ensaio. A Tabela 3 mostra um resumo dos dados obtidos para ambos os modelos de caixas sob condições padronizadas de ensaio. As deformações listadas são médias de 5 replicatas em polegadas (mm).

Apenas as caixas com 80% de carga falharam dentro das 12 horas, para ambos os modelos de caixas. Isso sugere que a deformação pode ser uma indicação base para o colapso da caixa, indiferente do nível de carga ou tempo de exposição.

Se isto for verdade, a deformação fornece uma maneira de estimar o tempo de colapso das caixas que não falharam durante as 12 horas de ensaio de fluência. A Tabela 3 mostra que os incrementos de deformação se mantiveram uniformemente próximos a 0,01 polegada (0,25mm) nas linhas dentro da mesma coluna. Mas os espaços de tempo entre as linhas foram cada vez maiores. Isso significa que a taxa de fluência decresceu ao longo do tempo. As maiores taxas ocorreram no primeiro minuto, durante o qual as caixas

atingiram uma grande fração da deformação total obtida no ensaio segundo a norma ASTM D642. Após 12 horas, foi obtida apenas mais 20% de deformação.

TABELA 3. Deformação versus tempo sob carga constante.

| Caixa A: RC = 730lb (3247N) @ 0,28 pol (7,1mm) | | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|---------------|
| Tempo (min) | @20%RC | @40%RC | @60%RC | @80%RC |
| 1 | 0,110 pol (2,8mm) | 0,146 (3,71) | 0,198 (5,03) | 0,228 (5,79) |
| 30 | 0,120 (3,05) | 0,160 (4,06) | 0,212 (5,38) | 0,278 (7,06) |
| 120 | 0,121 (3,07) | 0,163 (4,14) | 0,221 (5,61) | Falha |
| 720 | 0,130 (3,30) | 0,168 (4,27) | 0,230 (5,84) | Falha |
| Caixa B: RC = 1240lb (5516N) @ 0,5 pol (12,7mm) | | | | |
| Tempo (min) | @20%RC | @40%RC | @60%RC | @80%RC |
| 1 | 0,270 pol (6,9mm) | 0,338 (8,59) | 0,414 (10,5) | 0,476 (12,1) |
| 30 | 0,280 (7,11) | 0,362 (9,19) | 0,441 (11,2) | 0,510 (13,0) |
| 120 | 0,290 (7,37) | 0,370 (9,40) | 0,450 (11,4) | Falha |
| 720 | 0,301 (7,65) | 0,384 (9,75) | 0,472 (12,0) | Falha |

As deformações que ocorrem são nitidamente variáveis em função da alta qualidade da caixa. Usar apenas alguns dos dados obtidos para fazer uma predição conduziria a grandes erros. Por esta razão, decidiu-se que a única informação que pode ser considerada segura é a média da taxa de fluência, definida aqui como uma função linear que melhor se ajustou aos dados das caixas e cargas particularmente estudados. O processo de ajuste pode ser feito graficamente, por cálculo da curva usando apenas o primeiro e último dado ou por software de ajuste de curvas que pondera todos os pontos igualmente. Os resultados são quase iguais. Um software foi usado para determinar as curvas da Tabela 4. Um total de onze dados foi usado para cada combinação de carga e modelo de caixa, não apenas os 4 dados apresentados na Tabela 3. O ponto inicial dos dados deve corresponder a um tempo que seja suficiente para permitir que o equipamento atinja a carga desejada. Apenas depois que essa carga é alcançada os dados devem ser considerados.

Exceto por uma anomalia (Caixa A, 40%), a taxa de fluência subiu conforme o incremento de carga. Se fossem utilizados dados com tempo de teste após 12 horas, os números da Tabela 4 poderiam diminuir porque o decréscimo da taxa de fluência desses tempos traria as médias para baixo. Usar somente os dados até 12 horas aumentou os números da Tabela 4.

TABELA 4. Taxa de Fluência Média durante 12 horas de teste em pol/min (mm/min).

| Carga (% de resistência à compressão) | Caixa A Taxa de Fluência Média -12 horas | Caixa B Taxa de Fluência Média - 12 horas |
|---|--|--|
| 20% | 2,50 x 10 ⁻⁵ (6,36 x 10 ⁻⁴) | 3,58 x 10 ⁻⁵ (9,09 x 10 ⁻⁴) |
| 40% | 2,23 x 10 ⁻⁵ (5,66 x 10 ⁻⁴) | 4,77 x 10 ⁻⁵ (12,1 x 10 ⁻⁴) |
| 60% | 3,35 x 10 ⁻⁵ (8,52 x 10 ⁻⁴) | 6,25 x 10 ⁻⁵ (15,9 x 10 ⁻⁴) |
| 80% | 29,3 x 10 ⁻⁵ (74,5 x 10 ⁻⁴) | 104,7 x 10 ⁻⁵ (265 x 10 ⁻⁴) |

Baseado nos dados coletados neste estudo, um grupo de trabalho iniciou em 2003, através do comitê de embalagem ASTM D10, o desenvolvimento de uma nova norma de ensaio, utilizando a metodologia descrita neste artigo. O novo método de ensaio foi aprovado em 2004. O método de ensaio é a norma ASTM 7030-04 "Short Term Creep Performance of Corrugated Fiberboard Containers Under Constant Load Using a Compression Test Machine".

Previendo a falha ao longo do tempo

Se caixas falham por fluência quando atingem a deformação obtida no ensaio ASTM D642, então o tempo de falha para um nível de carga em particular é o tempo que ele deverá levar para atingir esta distância através da taxa de fluência média,

Equação 1

$$T = D/R$$

T= tempo para ocorrer a falha (min)

D = deformação obtida no ensaio segundo a norma ASTM D642 (polegadas ou mm)

R = taxa de fluência média (polegadas/min ou mm/min) no nível de carga P

P= nível de carga expressa como uma porcentagem da resistência à compressão obtida no ensaio segundo a norma ASTM D642

O problema desse cálculo é que nós não temos o R, porque ele é a média sobre o tempo total do carregamento até a falha da caixa. Nós temos apenas R12, que é a média da taxa de fluência durante 12 horas de ensaio. O R na Equação 1 pode ser calculado multiplicando o R12 por um fator de correção. O fator de correção deve satisfazer as seguintes condições: para P=0 (sem carga) R deve ser igual a 0, pois T tende a infinito (nunca ocorrerá a falha), e para P=100 (carga total) R tenderá a infinito, pois T tenderá a 0 (ocorrência de falha imediata). Embora este contraponto não determine completamente o fator de correção, ele limita as opções. Estas condições sugerem que o fator de correção é principalmente função do nível de carga.

O fator de correção na Equação 2 abaixo satisfaz esses requisitos e prevê os tempos de falha com boa correlação com os resultados experimentais. Entretanto, deve-se lembrar que este fator de correção se aplica apenas para taxa de fluência média de 12 horas de teste, não para testes com duração maior ou menor.

Equação 2

$$R = R_{12} \times P / (100 - P)$$

R₁₂ = taxa de fluência média de 12 horas de teste

Vamos considerar a caixa A com carga de 40% da resistência obtida no ensaio, segundo a norma ASTM D642 como exemplo: Os dados obtidos nos ensaios segundo ASTM D642 e teste de fluência foram:

D = 0,28 polegadas (7,1mm)

P = 40

R₁₂ = 2,23 x 10⁻⁵ pol/min (5,66 x 10⁻⁴ mm/min) da Tabela 4

R = 1,49 x 10⁻⁵ pol/min (3,78 x 10⁻⁴ mm/min) da Equação 2

T = 18792 min = 13 dias da Equação 1

A previsão de falha era de 13 dias e o tempo efetivo era de 14 dias da Tabela 2. O fator de resistência remanescente apresentado na Tabela 1 previa pelo menos 3 anos para ocorrência da falha. A previsão do tempo de colapso baseada nas equações 1 e 2 são comparadas na Tabela 5 com as efetivas obtidas através do teste com sacos de areia da Tabela 2. Também são apresentadas as previsões de tempo baseadas nos fatores de resistência remanescente da Tabela 1. A Tabela 5 mostra que as previsões baseadas nas equações 1 e 2 são consistentemente melhores que aquelas baseadas na Tabela 1.

TABELA 5. Tempo de falha efetivo e estimado sob carga constante.

| Carga (% de resistência à compressão) | Tempo Efetivo | Tempo Previsto (Equações 1 e 2) | Tempo Previsto (Tabela 1) |
|---------------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------------------|
| 20% | 6 semanas + | 31,1 dias | Nunca |
| 40% | 14 dias | 13,1 dias | Aproximadamente 3 anos |
| 60% | 2 dias | 3,8 dias | 30 dias |
| 80% | 0,5 h | 4 horas | 10 horas |

Conclusões

Os dados de fatores de resistência remanescente da Tabela 1 superestimam significativamente a resistência das caixas testadas. Os resultados obtidos no teste de sacos com areia da Tabela 2 apresentaram fatores mais realistas, mas são limitados para os dois modelos de caixas testados.

Uma forma de prever a resistência sem ter que confiar em fatores de resistência remanescente de publicações, como os apresentados nas Tabelas 1 ou 2, e sem ter que realizar ensaios com sacos de areia, é fazer o teste de fluência de 12 horas no equipamento de compressão. A curva que melhor se ajusta aos dados de deformação versus tempo é usada nas Equações 1 e 2 para se fazer a previsão.

Todos os dados apresentados neste artigo foram obtidos em condições padronizadas, o trabalho com esses dados tem mostrado que o método de previsão apresentado também pode funcionar para condições não controladas. Parte deste estudo foi repetida para a

condição 27°C e 80%UR usando os mesmos modelos de caixas. A resistência à compressão das caixas sob essas condições foi de 560lb (2491N) @ 0,23polegadas (5,8mm) para a Caixa A e 945lb (4203N) @ 0,5 pol (12,7mm) para a Caixa B.

O teste de fluência de 12 horas foi realizado com as caixas condicionadas nesse novo ambiente, fechando-se as caixas em sacos plásticos durante o teste para manter as condições de umidade (o teste de compressão não precisou ser realizado sob essas condições ambientais). Os testes com sacos de areia foram realizados em câmara climatizada a 27°C e 80%UR. Devido ao tempo e restrições de espaço, os resultados não puderam ser apresentados aqui porque estavam incompletos. Os dados já obtidos até o momento estão com boa correlação com as previsões das Equações 1 e 2.

Referências

- [1] Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, Volume 15.09, 2002.
- [2] Guins, S.G., Notes on Package Design, pp. 2-31, 32, 4th ed., Michigan State University, East Lansing, MI, 1981.
- [3] Maltenfort, G.C., Corrugated Shipping Containers – An Engineering Approach, ISBN:0-9616302-1-3, chapter 8, Jelmar Publishing Co., Plainview, NY, 1988.
- [4] Maltenfort, G.C., Performance and Evaluation of Shipping Containers, ISBN:0-9616302-3-X, Jelmar Publishing Co., Plainview, NY, 1989.