

ANÁLISE DA EXPLOSÃO DO TAMBOR DE UM REVÓLVER CALIBRE “.454 CASULL”¹

*Fernando César de Mattos, Engº Mec., M.Sc.²
André Paulo Tschiptschin, Prof. Dr.³*

Resumo

Em virtude da ocorrência de um acidente de elevadíssimo potencial de risco à integridade física dos atiradores, foi realizado um detalhado estudo visando determinar(em)-se a(s) causa(s) da explosão do tambor de um revólver calibre “.454 Casull” durante uma seção de instrução. Após o acidente, ocorreu a separação do tambor em duas metades, que foram violentamente projetadas para os lados, pondo em risco os demais atiradores situados lateralmente na pista de treinamento. A arma é nova, com cerca de apenas 500 disparos efetuados. Objetiva-se determinar se a falha da arma deve-se a alguma deficiência de projeto, fabricação ou alguma particularidade do espécime falhado (no uso, material, geometria ou acabamento daquele revólver específico). Para tanto foram empregados os seguintes recursos de análise: medição de dureza, exame visual das superfícies fraturadas, análise microfractográfica, caracterização microestrutural e análise estrutural do componente afetado pelo método dos elementos finitos (MEF). Concluiu-se que a explosão era decorrente de uma falha de matéria prima não detectada pelas rotinas de controle da qualidade do fabricante do revólver. Foi então proposto, como medida capaz de evitar a repetição do problema, um conjunto de sugestões relativo a realização de ensaios não destrutivos de recebimento, pelo lado do fabricante, e de inspeções periódicas para análise de integridade do armamento usado, pelo lado do usuário.

Palavras-chave: Armamento; Inclusões; Análise de falhas.

¹ 60º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte - MG

² Fernando César de Mattos & Associados Engenharia Ltda. / Escola Politécnica da USP (PECE)

³ Escola Politécnica da USP (PMT – Departamento de Engª Metalúrgica e de Materiais)

INTRODUÇÃO

Armas de fogo são equipamentos dotados de um ou mais canos, abertos numa das extremidades e parcialmente fechados na parte de trás, por onde se coloca o projétil, que é lançado à distância através da força expansiva dos gases oriundos da queima de determinada quantidade de combustível sólido, normalmente algum tipo de pólvora química.

Para se efetuar um disparo com o revólver, o usuário deverá pressionar o gatilho da arma na direção do cabo com o dedo indicador, movimento que acionará um mecanismo de molas e alavancas cuja finalidade é liberar a trava do cão, elemento que, atuando como um martelo, impulsiona um componente denominado percussor contra o fundo do cartucho de munição, local onde se encontra alojada a mistura iniciadora cuja função é, ao ser detonada pelo impacto, promover a ignição do propelente (pólvora). Esta detonação produz chamas de alto poder calorífico que passam por orifícios existentes no fundo do alojamento da espoleta e dão início à combustão dos grãos de pólvora. A pólvora em combustão tem a propriedade de produzir, em curtíssimo espaço de tempo (milésimos de segundo) um volume de gases muito superior àquele ocupado anteriormente, quando ainda em estado sólido. Como o cartucho está confinado na câmara da arma e a única saída livre é o cano, a pressão desenvolvida pelos gases gerados acaba por impelir o projétil através desta saída.

A Figura 1 abaixo, uma vista (esquemática) em corte mostrando um estojo no interior do cano de uma arma, permite ótimo entendimento do princípio básico do disparo: em “A” o cartucho ainda não foi detonado; em “B” a detonação já ocorreu e o projétil já se desengastou do estojo; em “C” o projétil encontra-se na metade de seu trajeto no interior do cano da arma, e em “D” está prestes a sair totalmente do mesmo.

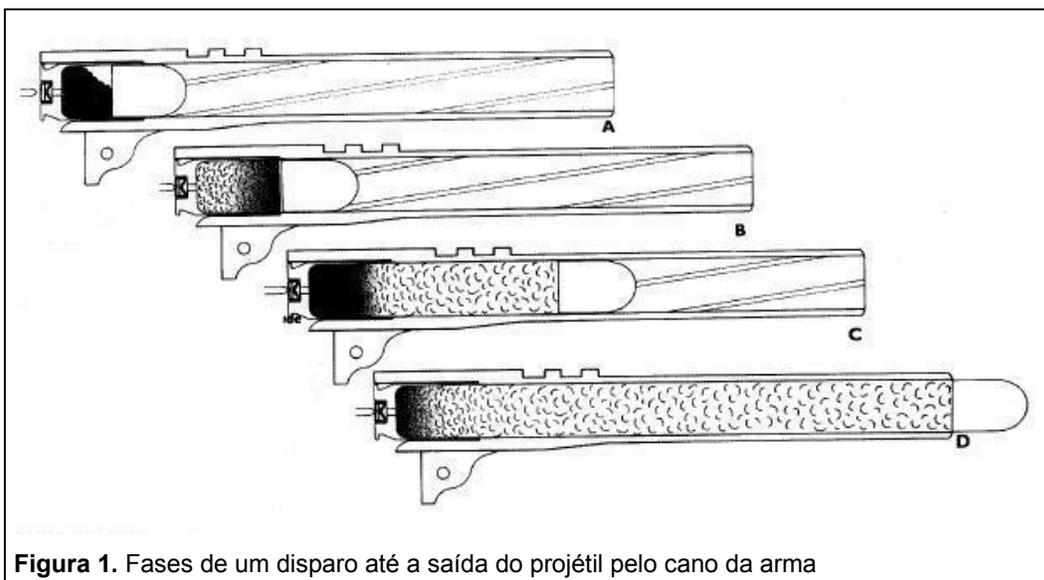


Figura 1. Fases de um disparo até a saída do projétil pelo cano da arma

A Figura 2 abaixo mostra a seqüência do disparo de um revólver semelhante ao estudado no presente trabalho.



Os esforços mecânicos envolvidos caracterizam-se pela elevada intensidade e curta duração da solicitação, sendo a câmara (localizada no tambor, quando tratamos de revólveres) e o cano as partes mais solicitadas durante o disparo de uma arma de fogo. Devemos ainda lembrar que há considerável interferência entre o cano da arma e o projétil, que é forçado contra o raiamento para adquirir movimento de rotação em torno de seu eixo (estabilizando sua trajetória fora do cano), de modo que o fenômeno de atrito também é relevante. A cada disparo, o tambor é submetido a um pulso de pressão hidrostática (pressão interna atuante sobre toda a superfície interna), enquanto o cano é submetido a um pulso de tração e carregamento tribológico (cada ponto do comprimento de sua superfície interna sofre um pulso de compressão superficial, conforme o projétil passa). Existem, desta forma, solicitações cíclicas e ocorrência de falhas por fadiga nos componentes citados. Fica evidente que os materiais a serem empregados na fabricação das armas de fogo em geral, tambores e canos de revólveres em particular, devem apresentar elevada resistência mecânica e limite de escoamento; alta resistência à fadiga; elevada tenacidade à fratura; e grande resistência ao desgaste (abrasivo, adesivo e erosivo). Todas as características mencionadas acima estão relacionadas com materiais que tenham uma microestrutura fina e sejam o mais isentos de impurezas possível (livre de sulfetos, óxidos, etc.). Também é desejável que o material a ser utilizado na fabricação da arma apresente boa resistência à corrosão, por questões estéticas e de durabilidade.



Figura 3. Revólver calibre “.454 Casull” cujo tambor explodiu; observa-se a metade encontrada do tambor fraturado (visto de topo).

Durante uma sessão de instrução realizada em 2003 nas dependências do clube de tiro IRON, em São Paulo, após ter sido efetuado um disparo, constatou-se o rompimento do tambor do revólver que se dividiu em duas partes violentamente projetadas para os lados.

Adicionalmente, foram observados outros danos à estrutura do armamento –

deformações plásticas associadas à ruptura parcial da ponte (parte da estrutura que fica sobre o tambor) e projeção da alça mira (parte do aparelho de pontaria) para cima – como mostra a figura 3 acima.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

O objeto da análise de falha ora apresentada trata-se de um revólver no calibre “.454 Casull”, fabricado em aço inoxidável martensítico e dotado de um tambor com 5 câmaras, para alojar igual número de cartuchos de munição. De acordo com os padrões da SAAMI, esta munição apresenta um projétil com diâmetro de 11,48 mm, pesando 15,6 gramas, que é lançado a uma velocidade de 571,5 m/s (medida na boca do cano), desenvolvendo pressões internas na câmara da ordem de 45.200 CUP (cerca de 56.500 psi ou 390 N/mm²). Apenas para efeito de comparação na energia cinética medida na boca do cano, foram escolhidos os dois calibres mais “potentes” cujo uso é legalmente permitido no Brasil – o “.380 ACP”, calçado por pistolas semiautomáticas (projétil com 9,01 mm de diâmetro e 6,16 gramas de peso, que é lançado a 290 m/s, desenvolvendo pressões de 18.900 CUP cerca de 23.625 psi ou 162,78 N/mm²) na câmara) e o “.38 SPL”, usado em carabinas e revólveres (projétil com 9,07 mm de diâmetro e 10,24 gramas de peso, lançado a 230 m/s; também desenvolvendo pressões de 18.900 CUP (~ 23.625 psi ou 162,78 N/mm²) na câmara).

Os resultados são mostrados na Tabela 1. Esta tremenda diferença nos valores de energia cinética alcançados (mais de 10 vezes no caso da munição para pistola) justifica-se pela própria proposta do calibre “.454 Casull”, criado para reproduzir a balística de um fuzil¹ em uma arma curta, capaz por exemplo de abater animais de grande porte com um único tiro. A referência [3] mostra que além do padrão SAAMI, a munição do calibre “.454 Casull” pode ser encontrada com várias outras combinações de pesos de projéteis e cargas de propelente, resultando em diferentes resultados de velocidade na boca do cano e pressões na câmara. Em nossos estudos foi adotada a pressão mais elevada dentre as possíveis para o calibre:

57.800 CUP, valor que permite lançar um projétil de 16,9 gramas a uma velocidade de 548,64 m/s (resultando em uma energia cinética de 2.543,5 Joules).

Tabela 1. Comparação da energia cinética produzida por 3 calibres diferentes

Denominação do Calibre	Energia Cinética (J)
“.454 Casull” (objeto de nosso estudo)	2.547,6
“.380 ACP” (máx permitido p/pistolas semi-automáticas)	259,03
“.38 SPL” (máx permitido para carabinas e revólveres)	270,85

Foram realizados uma série de ensaios para levantamento dos dados a respeito da falha. Usando um durômetro portátil digital do tipo “dureza por rebote” constatamos uma variação de durezas entre 323 HB (escala Brinnell) e 335 HB entre os diversos pontos medidos no tambor fraturado. Tomou-se o cuidado para que o ponto de impacto do penetrador esférico ficasse sempre em região com baixo nível de deformações, evitando assim ruído nos resultados. Outra análise (aproximada) possível a partir dos dados deste ensaio, é a avaliação indireta do limite de resistência à tração do material testado. De acordo com a norma DIN 50150, que estabelece uma correspondência entre os valores de dureza Brinnell e o limite de resistência para aços, as leituras encontradas no tambor fraturado implicariam em valores de resistência à tração entre 1095 MPa e 1125 MPa⁴, valores compatíveis com aquilo que se espera de aços inoxidáveis martensíticos na condição temperado e revenido.

O aspecto fibroso apresentado ao longo de todas as superfícies fraturadas aponta para material de comportamento dútil e descarta totalmente o modo de falha por fadiga. A zona de cisalhamento estreita (nas bordas) é coerente com a pequena espessura da seção resistente. O início da fratura foi localizado na região interna da câmara, próximo ao furo do extrator (eixo do tambor), na região de saída do projétil, próximo a um rebaixo ali existente, em área com grande concentração de inclusões e sulfetos.

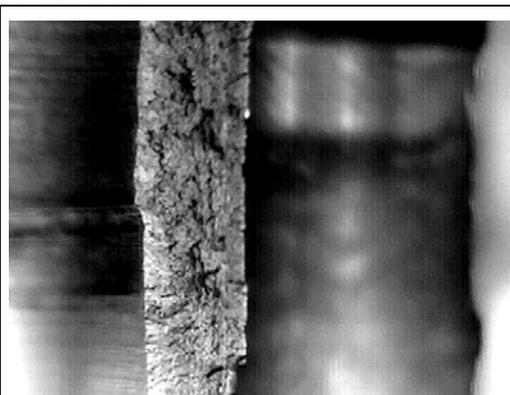


Figura 4. Aspecto fibroso da superfície fraturada.



Figura 5. Pequenos pontos esféricos de coloração dourada na superfície da fratura.

⁴ 1 MPa = 1 N/mm²

Uma das metades do tambor fraturado, do lado que fica próximo ao cano da arma (lado da saída do projétil), foi polida até o nível de preparação adequado para o ensaio metalográfico, cujos resultados vemos na fotografias abaixo (aumento 200x).



Figura 6. Os pontos escuros representam inclusões não metálicas e sulfetos encontrados em grande quantidade próximo à fratura.



Figura 7. Estrutura martensítica do material do tambor (após ataque com reagente Vilella, imersão por 1 minuto).

Como se nota nas imagens acima, a micrografia da parte dianteira do tambor mostra uma estrutura martensítica revenida (Figura 7, após ataque com reagente Vilella) e também uma vasta presença de inclusões não metálicas e sulfetos (Figura 6, antes do ataque), especialmente concentrada na parte central do tambor, próximo ao furo do extrator, local exatamente onde foi observado o início da fratura.

É bem conhecido o efeito altamente negativo que a presença de sulfetos na microestrutura tem sobre a resistência ao impacto (tenacidade à fratura) do material.

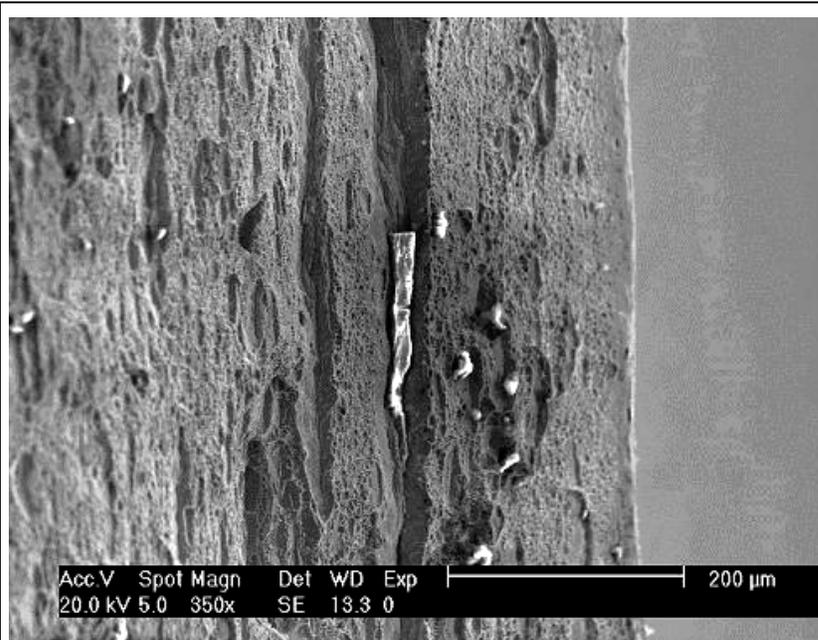


Figura 8.

Análise por microscopia eletrônica de varredura.

Elétrons secundários.
Aumento: 350X.

Observa-se uma fratura fibrosa com "dimples".

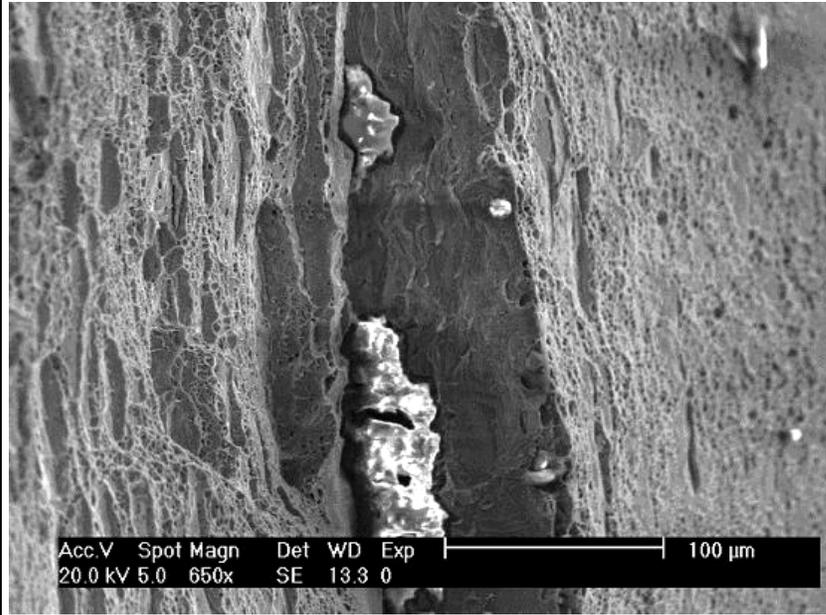
Superfície de separação ao longo de uma inclusão não metálica macroscópica.

Figura 9.
Análise por
microscopia
eletrônica de
varredura.

Elétrons
secundários.
Aumento: 650X.

Observada uma
fratura fibrosa
com “dimples”.

Superfície de
separação ao
longo de
inclusão não
metálica
macroscópica.



A análise das superfícies da fratura ao microscópio eletrônico de varredura (ver Figuras 8 e 9 acima), confirmaram em larga escala as observações dos ensaios macro e micrográficos. Vê-se claramente as superfícies de separação ao longo de inclusões não metálicas macroscópicas, e, no restante do material, o comportamento dútil esperado para este tipo de material, sob este regime de utilização.

A seguir foi efetuada uma análise semi-quantitativa dos elementos componentes tanto do material base como da inclusão (Figuras 10 e 11, a seguir):

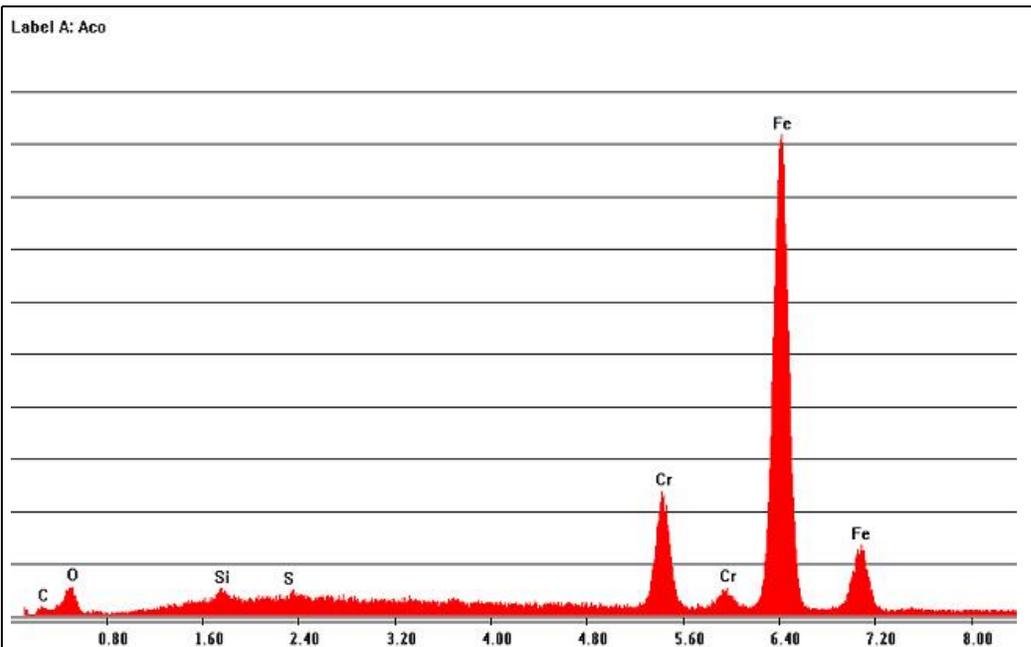
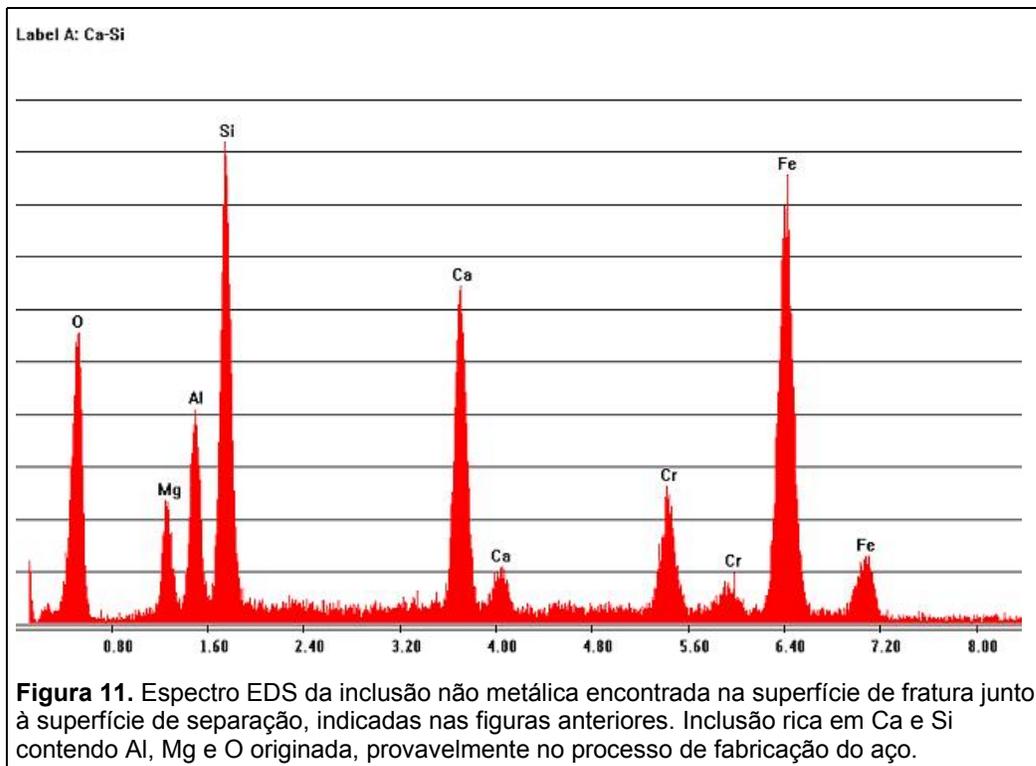


Figura 10. Espectro EDS de “raios X” do aço do tambor. Resultado: aço inoxidável.



Baseados nas dimensões efetivamente verificadas na peça falhada, e construiu-se um modelo simplificado para simular, através do método dos elementos finitos, os níveis e a distribuição das tensões no tambor do revólver, durante um disparo.

O modelo utilizado, cujos resultados são visíveis na Figura 12 abaixo, foi elaborado levando-se em conta as seguintes condições e características:

- Análise estática linear.
- Em razão da simetria geométrica planar, modelou-se apenas metade do tambor, reproduzindo-se os efeitos da outra metade através das condições de contorno apropriadas.
- Considerada a natureza dos esforços solicitantes durante o disparo – pressão hidrostática (agindo sobre a superfície interna da câmara) – e a forma geométrica do tambor – aproximadamente prismática – foram utilizados elementos finitos para estado plano de deformações.
- O tambor do revólver funciona apoiado por seu furo central (o de menor diâmetro) em um eixo, peça denominada “extrator”. A cada disparo uma única câmara é solicitada, e durante um disparo o tambor não pode girar.
- A discretização da geometria empregou 230 elementos isoparamétricos triangulares de seis nós (funções de forma parabólicas). Assim:

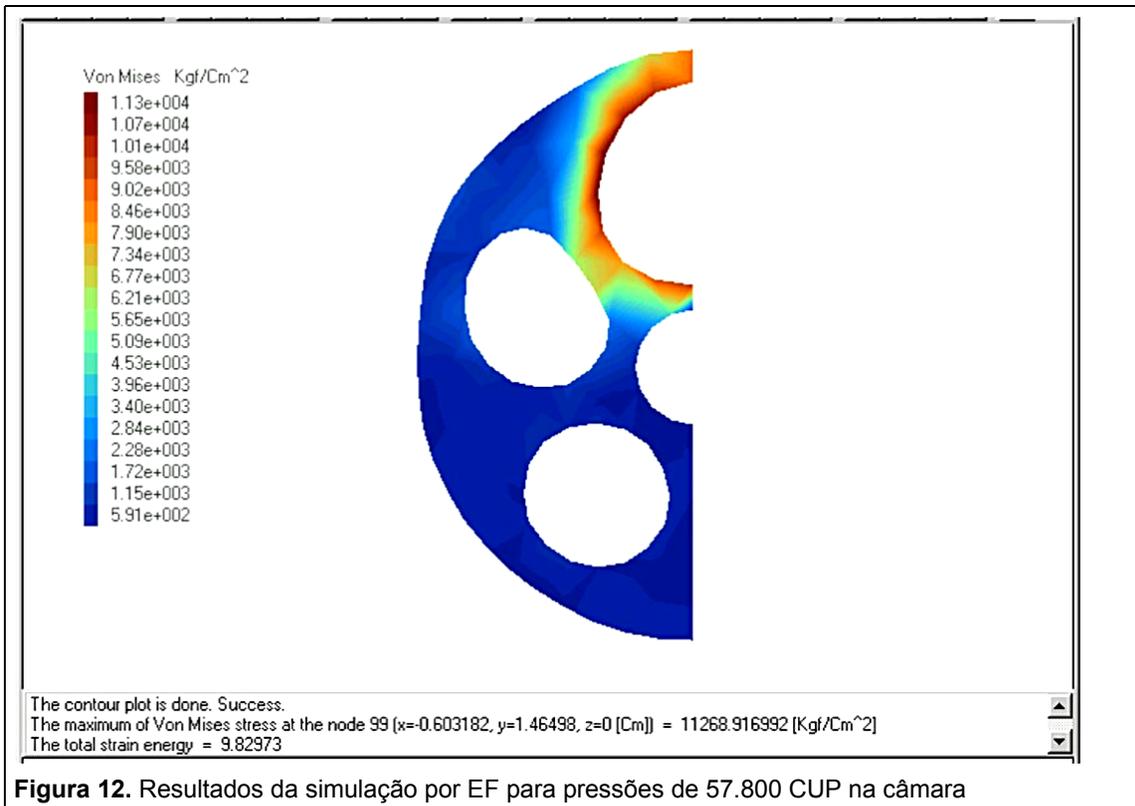


Figura 12. Resultados da simulação por EF para pressões de 57.800 CUP na câmara

Obtivemos os seguintes valores máximos para tensão de Von Mises:

- 865 MPa para pressões de 45.200 CUP (carga padrão SAAMI) e
- 1.105 MPa para pressões da ordem de 57.800 CUP (máxima, conforme referência [3]),

Ambos ocorrendo nos mesmos pontos, à cerca de 15° com a vertical (um ponto a 75° e outro, simétrico, a 105°, considerando-se uma câmara alinhada com a vertical e a origem no centro do furo do extrator).

O detalhe relevante é que este **ponto de máxima tensão de Von Mises não coincide com o local de início da fratura** (embora esteja em área também sujeita a elevado nível de tensões, assim como praticamente a maior parte do perímetro interno da câmara, como se vê na Figura 12 acima).

DISCUSSÃO

Pelos resultados dos ensaios de dureza, micrografia e uso da sonda EDS do MEV, concluímos que o material do tambor se trata de um aço inoxidável martensítico, provavelmente das séries 410 ou 420, normalmente adquirido na forma de barras cilíndricas trefiladas ou laminadas para posterior usinagem (fato que explicaria a concentração de inclusões na zona central e o formato alongado das superfícies de separação encontradas no exame ao MEV).

As durezas medidas no tambor fraturado e sua micrografia (exibindo uma estrutura martensítica), demonstram a adequação da escolha do material usado para fabricar o revólver. No tocante ao comportamento estrutural do tambor, por um lado temos os valores máximos de tensão encontrados (em nossa simulação por EF) compatíveis com o limite de resistência do material e por outro, o fato de que este ponto de máximo se dá em local diferente do da origem da fratura, fatos que

combinados nos levam a descartar qualquer falha no dimensionamento estrutural, refutando, assim, a hipótese de erro no projeto. O aspecto da superfície da fratura também nos leva a eliminar a hipótese de falha por fadiga. As inúmeras inclusões não metálicas presentes no material do tambor, concentradas próximas ao centro na vizinhança do furo do extrator, conforme se apurou tanto nas micrografias como pela análise por microscopia eletrônica de varredura, se constituem em sítios para nucleação de vazios e microtrincas que evoluirão para trincas (por coalescimento dos vazios sob ação dos esforços atuantes, isto é, a cada tiro disparado) reduzindo enormemente a resistência mecânica e a tenacidade à fratura do material. O ponto de início da fratura, exatamente nesta região, confirma tal realidade.

As elevadas pressões desenvolvidas pelo calibre “.454 Casull” implicam em tensões máximas muito próximas do limite de resistência do material, tornando estas armas muito mais sensíveis a deficiências de qualidade da matéria prima e fatores que fragilizem o material. Nestas condições - esforços atuantes elevados e deficiências de material - os riscos de uma falha tal como a que se deu são muito grandes.

A ocorrência de uma falha de “arma de fogo” em operação é algo que nunca pode ser menosprezado, tanto pelos riscos inerentes deste tipo de objeto como pelo próprio contexto de utilização: em uma caçada ou em um combate, a falha pode representar a perda da vida do usuário do armamento; numa competição, falhas tais como a presentemente abordada impõe riscos inaceitáveis à segurança do atirador e dos circunstantes. Para o fabricante do armamento, além das questões de natureza ética, prática e de imagem da empresa (não se deve ferir o usuário do seu produto), há também a questão judicial relacionada a responsabilidades indenizatórias e por danos morais, quase sempre envolvendo cifras capazes de ameaçar a continuidade da empresa. É justamente aqui que se insere o conceito do gerenciamento de riscos, definindo e focalizando a atenção (e os recursos necessários) sobre os itens potencialmente perigosos do produto. No presente caso, um simples ensaio metalográfico da seção transversal da barra de aço usada na fabricação do tambor bastaria para que fossem encontradas as inclusões não metálicas e de sulfetos que acabaram por causar a falha. Desejando-se uma maior rapidez na execução desta inspeção de recebimento, poder-se-ia executar um ensaio ultrassônico das barras, também capaz de detectar este tipo de alteração negativa na microestrutura do material.

CONCLUSÃO

A causa da falha pode ser creditada à deficiência de qualidade observada na matéria prima (presença de inclusões).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Das, A. K., “Metallurgy of Failure Analysis”, New York, McGraw-Hill, 1997.
- 2 James, C. Rodnei, et al, “The ABC’s of Reloading”, 6th Edition, Iola-WI-USA, DBI Books (a division of Krause Publication Inc.), 1997.
- 3 Freedom Arms Inc., “Revolver Loading Data for .454 Casull”, Freedom-WI-USA, Freedom Arms Inc., (Jul) 2003.
- 4 Zanotta, Creso M., “Conhecendo Melhor a Recarga de Munições”, Revista MAGNUM, São Paulo, Edição Especial nº 14, págs. 24-27, (Jan) 1996.

- 5 CBC – Companhia Brasileira de Cartuchos, “Manual de Aperfeiçoamento Profissional”, São Paulo, Companhia Brasileira de Cartuchos, págs. 1-15, (Jul) 1998.
- 6 Indústria Metalúrgica CELGON Ltda., “Informações Úteis”, Campina Grande – PB, web site da empresa (<http://www.celgon.com>).