

**XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E
PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009**

NATUREZA DO TRABALHO: PERÍCIA

***RUPTURA DE UMA ALÇA METÁLICA PARA IÇAMENTO DE PEÇAS PRÉ-
FABRICADAS DE CONCRETO: APLICAÇÃO DE MODELAGEM EM ELEMENTOS
SÓLIDOS SOB FADIGA NA PERÍCIA***

RESUMO:

O presente trabalho expõe os procedimentos utilizados no âmbito de uma perícia judicial para a investigação das causas da ruptura de uma alça metálica utilizada para içamento de peças pré-fabricadas de concreto, a qual vitimou fatalmente um funcionário de uma empresa construtora.

Palavras-chave: modelagem computacional, colapso estrutural, fadiga, concreto pré-moldado, solda.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

1 - INTRODUÇÃO

O concreto pré-moldado tem encontrado diversas aplicações na construção civil brasileira, muito embora sua utilização no Brasil ainda seja considerada modesta em comparação com alguns países, sobretudo os desenvolvidos.

Como conceitua a NBR 9062 – Projeto e execução de estrutura de concreto pré-moldado – um elemento pré-moldado é aquele executado fora do local de utilização definitiva da estrutura, com controle de qualidade. Já elemento pré-fabricado é o elemento pré-moldado executado industrialmente, mesmo em instalações temporárias em canteiros de obra, sob condições rigorosas de qualidade.

Uma vez disponibilizado na obra, o elemento pré-moldado é transportado até a sua posição definitiva, em uma operação conhecida como montagem. A montagem normalmente é feita com o auxílio de dispositivos de içamento, particularmente mediante alças de içamento, as quais devem ser adequadamente dimensionadas como preceitua a NBR 9062.

O caso ora objetivado tratou-se de uma perícia técnica de engenharia para a determinação das causas da ruptura da alça de içamento ocorrida em uma das obras de uma construtora, requerida no processo judicial, colapso que vitimou fatalmente um dos funcionários dessa mesma construtora, ensejando o ingresso em Juízo da viúva com pedido de indenização por danos materiais e morais.

2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 – Do painel:

A Figura 01 a seguir apresenta a peça pré-fabricada idêntica àquela que estava sendo içada na ocasião do sinistro.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009



Figura 01 – Peça de concreto constituinte da futura laje, similar àquela que estava sendo içada na ocasião do acidente.



Figura 02 – Acessório utilizado para deixar a peça na vertical, posição em que deve ser içada.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

As dimensões do painel que estava sendo içado podem ser vistas nas figuras seguintes. Com as dimensões informadas nas aludidas figuras, a peça encerrava uma massa de 3,65 toneladas.

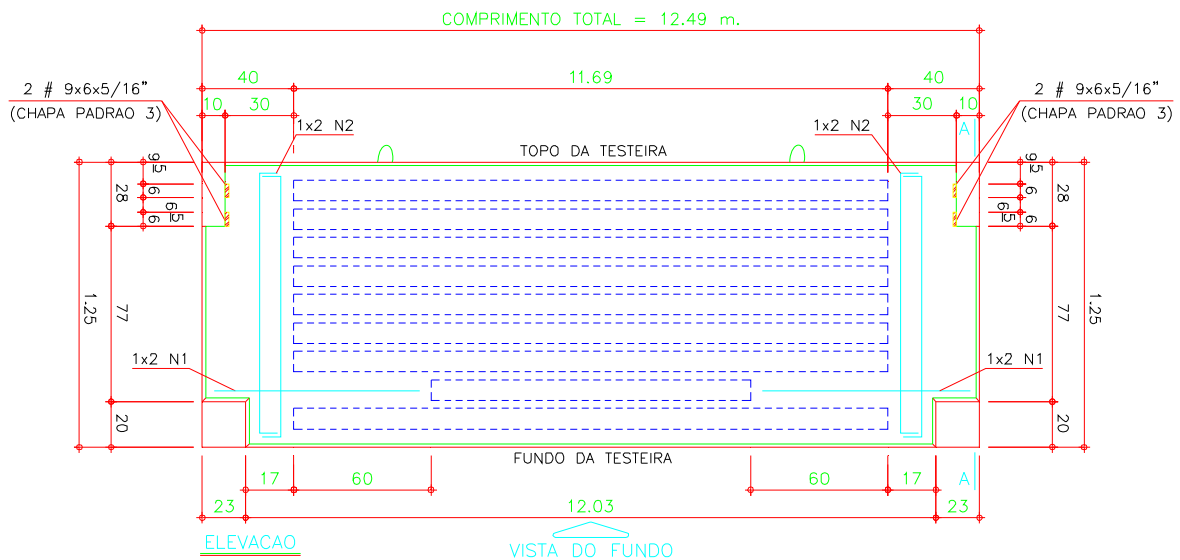


Figura 03 – Elevação do painel pré-moldado.

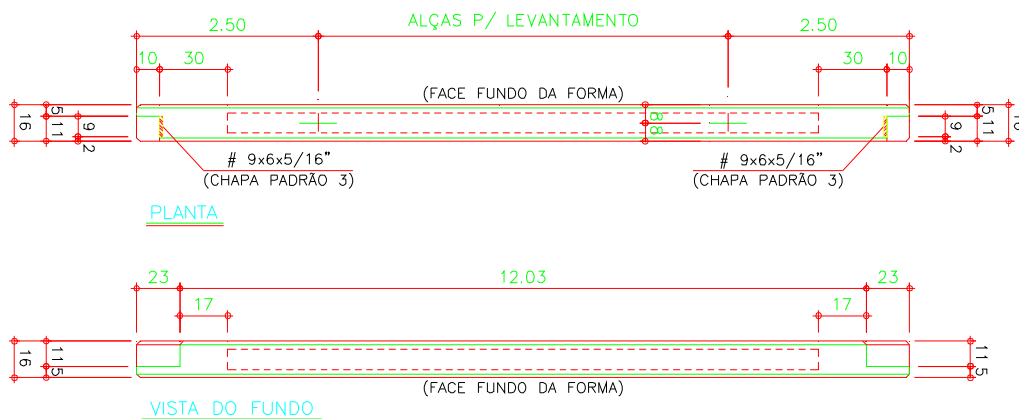


Figura 04 – Vistas do painel pré-moldado.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

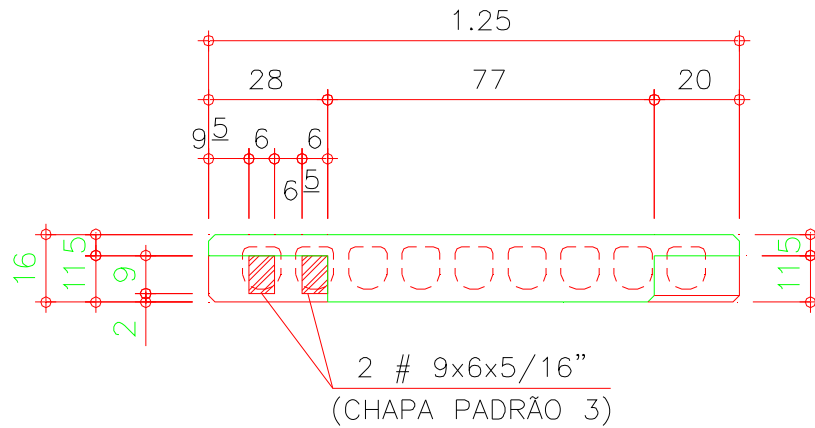


Figura 05 – Corte transversal do painel pré-moldado.

2.2 – Do sistema de içamento:

O sistema de içamento vinha caracterizado por uma barra metálica dobrada, soldada em uma placa metálica, formando um conjunto que era ligado ao painel através de luva rosqueada a um parafuso, como ilustra o croqui a seguir:

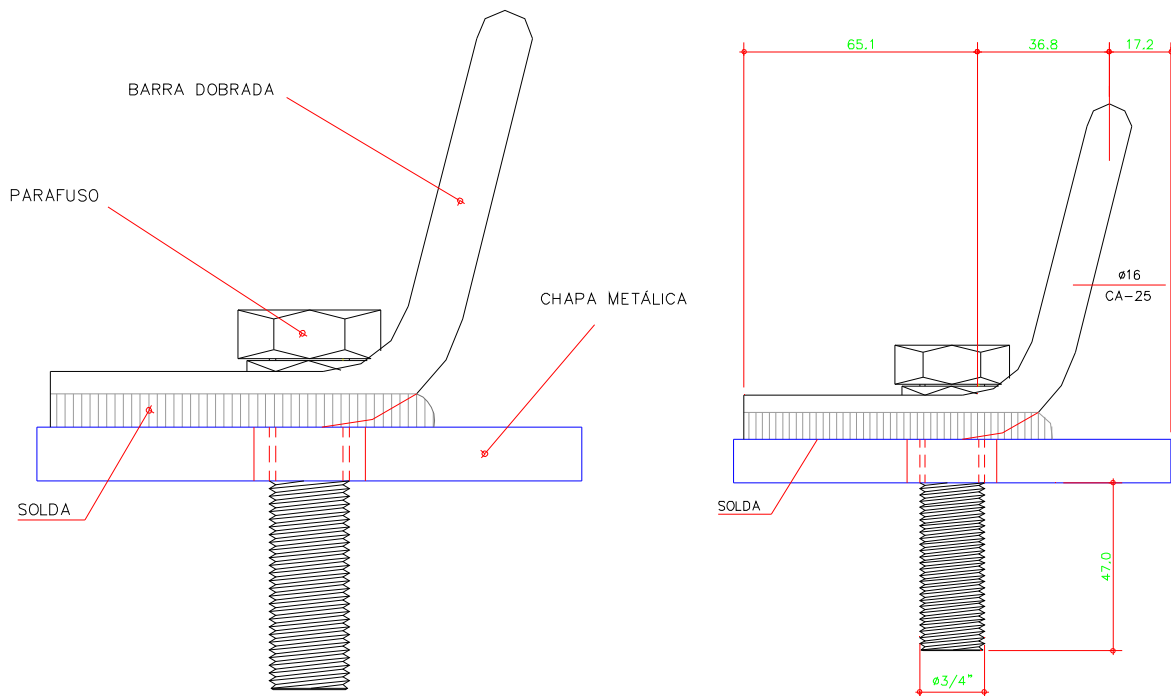


Figura 06 – Identificação das partes constituintes do aparelho de içamento e cotagem da peça.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

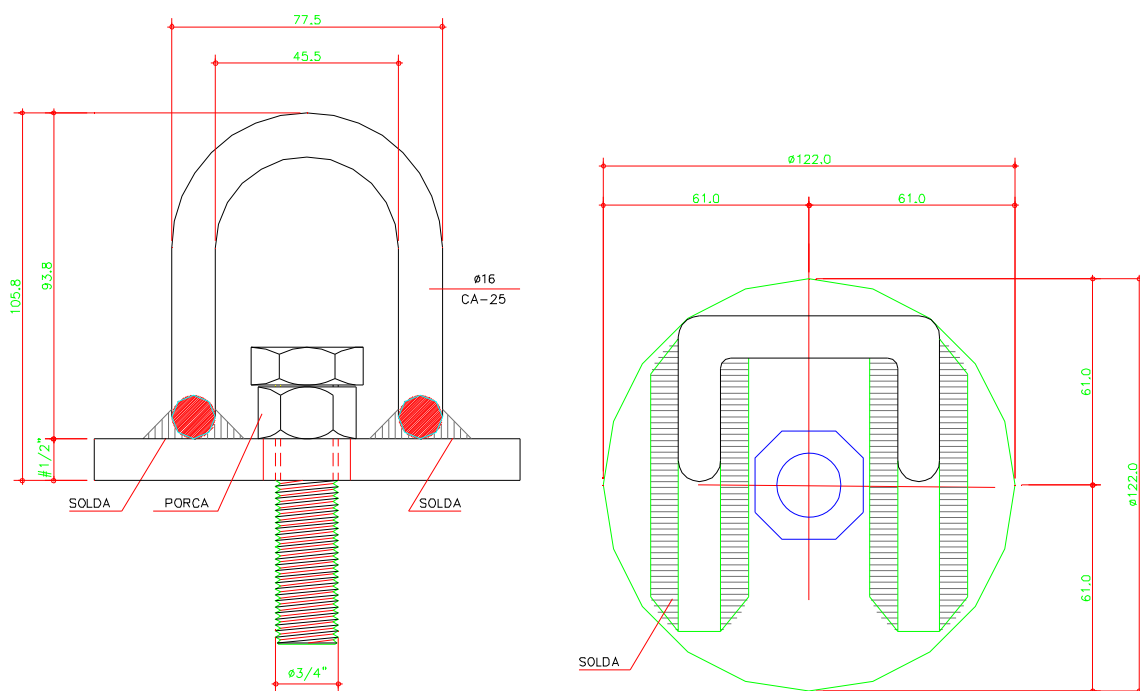


Figura 07 – Vista frontal e em planta do sistema de içamento.



Figura 08 – Vista da peça similar àquela rompida na ocasião do sinistro.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009



Figura 09 – Parafuso de ancoragem da alça de içamento ao painel de concreto.



Figura 10 – Luva em rosca fêmea inserida na peça de concreto, na qual é rosqueada o parafuso da alça de içamento.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

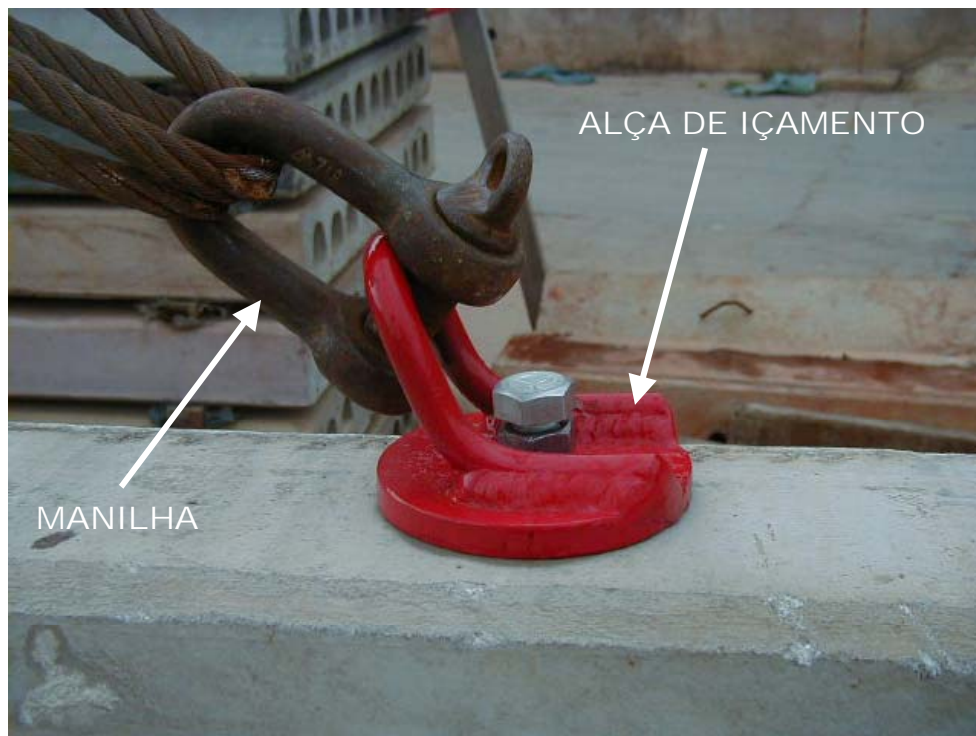


Figura 11 – Vista geral do sistema de içamento.

Constava do projeto do sistema de içamento que a barra dobrada que compunha a alça era constituída por aço CA-25 de diâmetro 5" (12,7mm). A chapa de ligação, soldada à alça era constituída do mesmo tipo de aço, com espessura de ½" (12,7mm).

3 – DA RUPTURA OCORRIDA

Quando dos procedimentos de montagem de um prédio industrial pela construtora requerida, houve uma súbita ruptura da alça de içamento, decorrendo na precipitação do painel pré-fabricado sobre um dos operários da obra, o qual veio a falecer dois dias após o acidente.

O lapso temporal entre o acidente ocorrido e a diligência pericial foi de aproximadamente 04 (quatro) anos, de forma que muitos elementos importantes para a investigação do sinistro não foram devidamente preservados, inclusive a alça rompida.

Destarte, não foi possível efetuar, por ocasião da perícia judicial, qualquer ensaio elucidativo, tal como ensaios de caracterização do aço ou análise microscópica da barra.

O único elemento que permitiu caracterizar a ruptura ocorrida foi uma foto existente nos autos do processo, a qual foi digitalizada e analisada pela equipe da perícia, como mostra a Figura 12.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

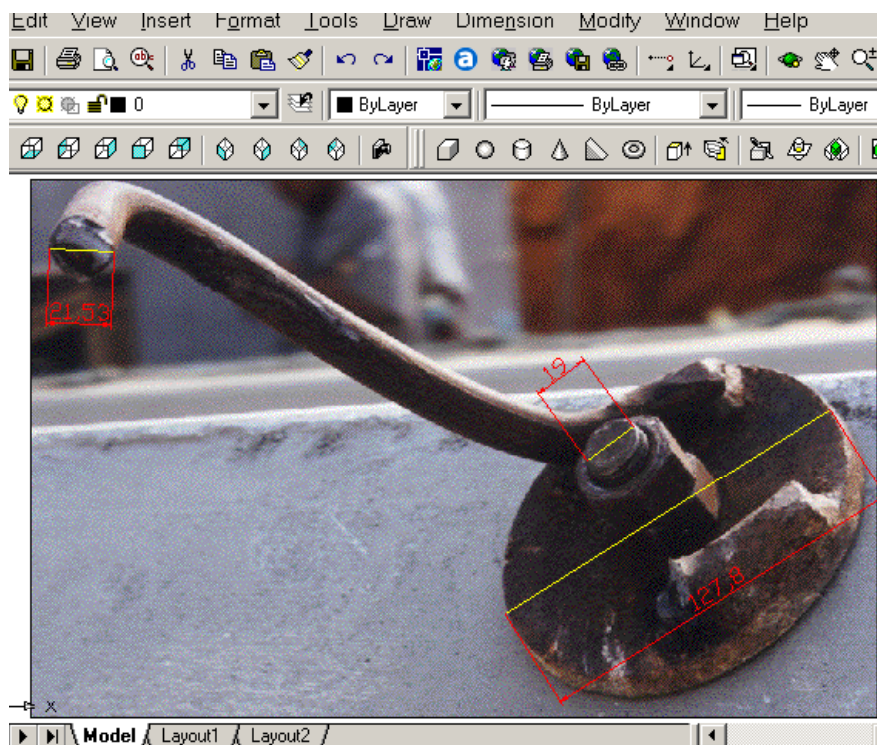


Figura 12 – Foto digitalizada da alça rompida, com as dimensões apuradas.

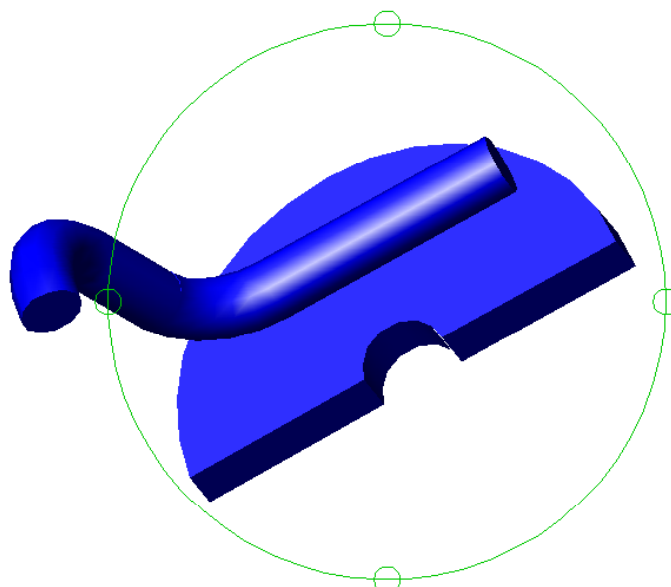


Figura 13 – Modelagem da alça, com base na figura anterior.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

Analisando-se a foto digitalizada na Figura 12, pode-se observar que a ruptura ocorreu, de fato, na barra dobrada que compunha o sistema de içamento. A foto também permite depreender que não houve qualquer estricção da seção da barra, possibilitando-se inferir que se tratou de uma ruptura frágil, muito embora a alça fosse constituída, em tese*, por aço CA-25 (aço dúctil ou “doce”).

A requerida alegava que a ruptura ocorreu porque durante as operações de montagem a peça teria sido içada por somente uma das extremidades, conforme ilustra a Figura 14.

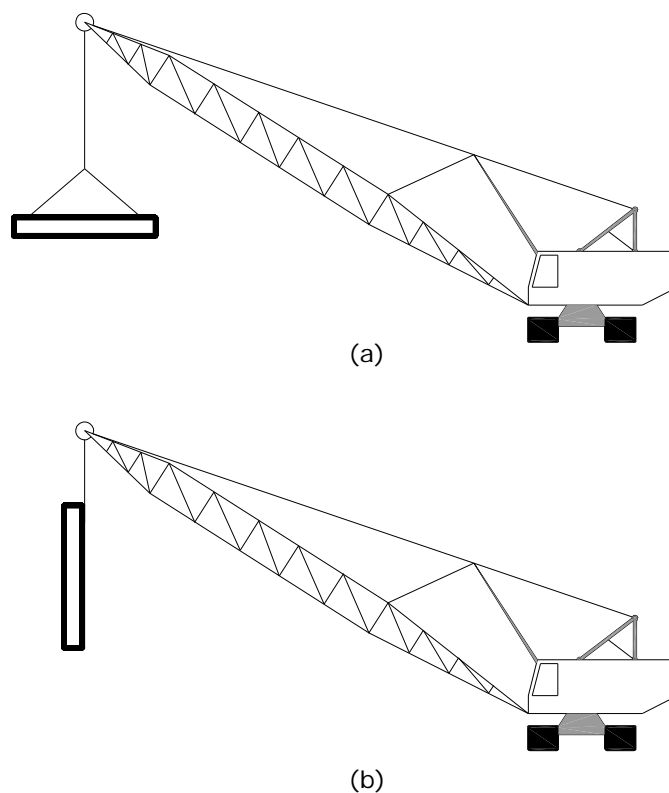


Figura 14 – Posicionamento adequado para o içamento (a) e posição de içamento na ocasião do acidente, segundo alegações da requerida (b).

Foram consideradas três hipóteses para o colapso da alça metálica:

- (i) Subdimensionamento estrutural;

* Entende-se que “em tese” a barra era constituída por aço CA-25 porque no projeto fornecido ao jurisperito constava tal informação. No entanto, tal informação constante no projeto não pode ser aferida em razão do extravio da peça, já mencionado.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

- (ii) Fadiga;
- (iii) Falha do material constituinte.

Como a perícia não teve acesso à peça rompida, a hipótese (iii), por óbvio, não pode ser verificada. Em que pese o fato de não ter sido possível examinar a peça colapsada, a equipe da perícia julgava que essa última hipótese era a menos provável no caso em testilha, haja vista que falhas de fabricação do aço são ocorrências muitíssimo menos freqüentes que as causas apresentadas nos itens (i) e (ii) supra.

Já a hipótese admitida pela requerida para explicação do acidente (içamento utilizando somente uma alça) está intimamente relacionada à hipótese (i), uma vez que, mesmo sob essa condição, a alça deveria ser capaz de sustentar a viga, eis que é dimensionada, consoante preconizado pela norma aplicável, considerando um fator mínimo igual a 4,0.

4 – INVESTIGAÇÃO DAS PROVÁVEIS CAUSAS DA RUPTURA DA ALÇA

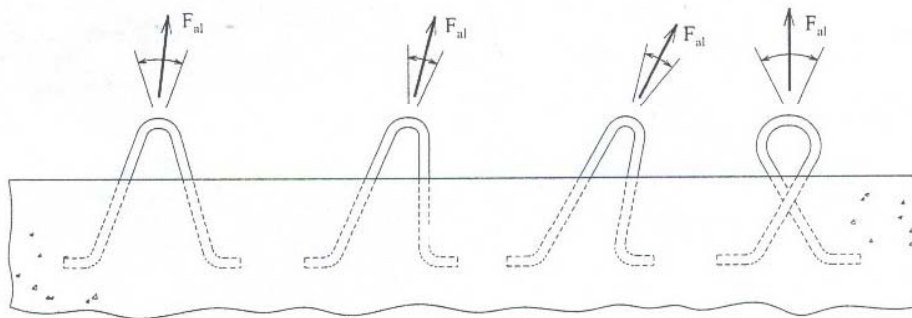
4.1 – Verificação do dimensionamento:

Como já mencionado no item 2.1, a viga pré-moldada possuía uma massa de 3,65 toneladas, valor este que será considerado para a determinação da carga na alça de içamento.

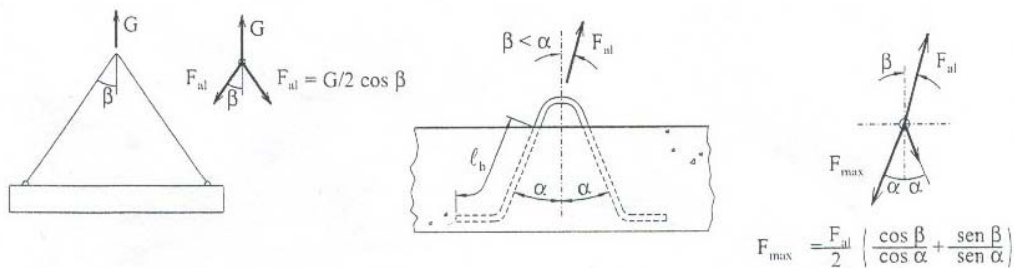
El Debs (2000) apresenta uma formulação completa para o dimensionamento de alças de içamento, em particular para alças embutidas em concreto. O dispositivo de içamento objetivado no Laudo Pericial não contemplava alças embutidas, porém a determinação dos esforços pode ser feita mediante a mesma formulação apresentada pelo autor, em razão da simetria do problema.

O autor supramencionado apresenta a seguinte figura esclarecendo as formas das alças de içamento e o cálculo da força na perna mais solicitada:

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009



a) Formas de alças de içamento



b) Força na perna mais solicitada da alça

Figura 15 – Cálculo da força na perna mais solicitada.

A força no cabo de içamento (F_{al}) deve ser calculada em função de diversos ângulos de inclinação do cabo (ângulo β da figura acima). A variação da força no cabo de içamento segue na tabela abaixo:

| Ângulo β | F_{al} (KN) |
|----------------|---------------|
| 30° | 1,58 |
| 45° | 1,29 |
| 50° | 1,17 |
| 55° | 1,05 |
| 60° | 0,91 |

Tabela – Variação da carga no cabo com o ângulo β , para uma carga de içamento de 3,65tf.

A equipe da perícia não obteve elementos que pudessem fornecer subsídios precisos acerca do ângulo β , de forma adotou-se o ângulo que resultasse na maior carga na perna, de 30°. Cumpre salientar que esse ângulo é bastante incomum na prática, sendo mais frequentemente observados ângulos próximos de 60°, resultando em cargas menores na alça. Com o ângulo adotado (30°) a força na alça resultaria em $F_{al} = 1,58tf$.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

De posse da carga na alça, e à luz da simetria da peça rompida, foi possível consignar que a carga na perna mais solicitada seria dada por:

$$F_{\max} = \frac{F_{al}}{2} = \frac{1,58}{2} = 0,79tf$$

O diâmetro da alça, conforme item 2.2, era de 16 mm ($\phi = 5/8''$). El Debs (2000) apresenta uma expressão para o cálculo do diâmetro mínimo necessário para a alça metálica, já considerando um fator de segurança FS = 4,0, como preconizado na NBR 9062/85. A formulação proposta deriva da seguinte desigualdade a ser verificada:
#

$$4F_k \leq \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \cdot f_{yk} \quad \#$$

#

Considerando-se que a alça era composta por aço CA-25 ($f_{yk} = 250$ MPa), e após simples manipulação algébrica, obtém-se
#

$$\phi \geq 4,5 \sqrt{F_k} \quad \#$$

Onde:

ϕ = diâmetro da barra constituinte da alça metálica, em mm;
 F_k = força máxima na perna mais solicitada, em KN;

Para uma força máxima na peça de $F_k = 0,79$ tf (7,9 KN), obtém-se, substituindo-se o valor da força máxima na formulação supra, um diâmetro mínimo de **$\phi = 12,65$ mm.**

Conforme cálculos supra apresentados nota-se que a alça com $\phi = 16$ mm, para o peso da peça pré-moldada considerada em projeto, ***atendia a normalização pertinente à matéria.***

Ressalta-se que o diâmetro da barra rompida conferia à alça resistência necessária para carregar a viga de concreto na forma como alegado pela requerida, se considerado o critério de dimensionamento apresentado na norma. Desta feita, a alegação da requerida de que a alça teria se rompido devido ao içamento da viga por somente uma das extremidades não foi corroborada.

À luz dos resultados da verificação do dimensionamento da alça metálica, a equipe da perícia procedeu à análises adicionais com o fito de obter elementos que pudessem explicar o colapso ocorrido.

4.2 – Modelagem computacional efetuada

Tendo em vista o resultado da verificação do dimensionamento da peça, primeira hipótese para o colapso ocorrido, a equipe da perícia procedeu a análises complementares para avaliação da segunda hipótese apresentada no item 3 do presente artigo, qual seja, ruptura por fadiga.

Tais análises somente poderiam ser efetuadas com auxílio de modelagem computacional da peça, conforme apresentado nos itens a seguir, uma vez que o extravio da peça impossibilitou a avaliação metalográfica da região da fratura.

Para que o comportamento estrutural da peça pudesse ser bem caracterizado foi feita a modelagem em elementos sólidos, com caracterização fiel á peça, como apresenta a figura a seguir:

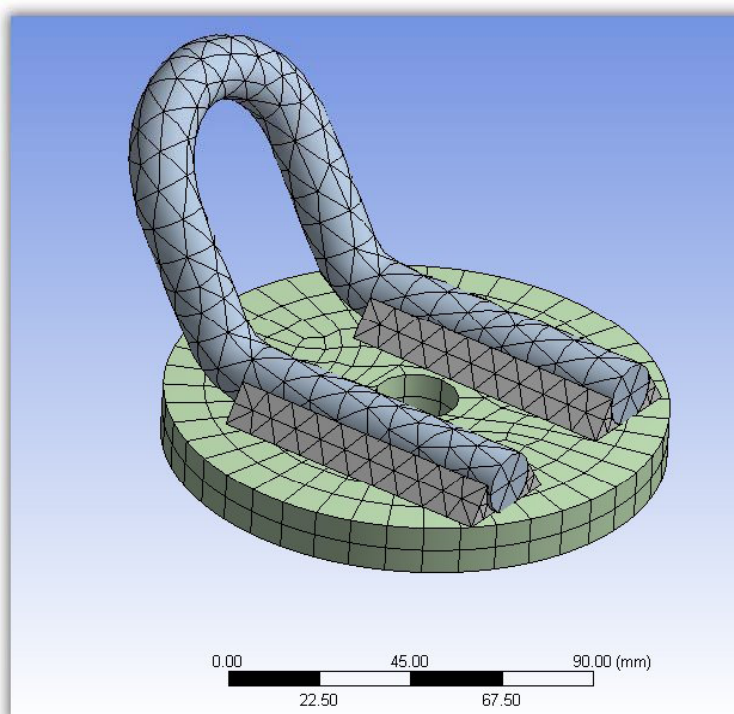


Figura 16 – Modelagem em elementos sólidos .

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

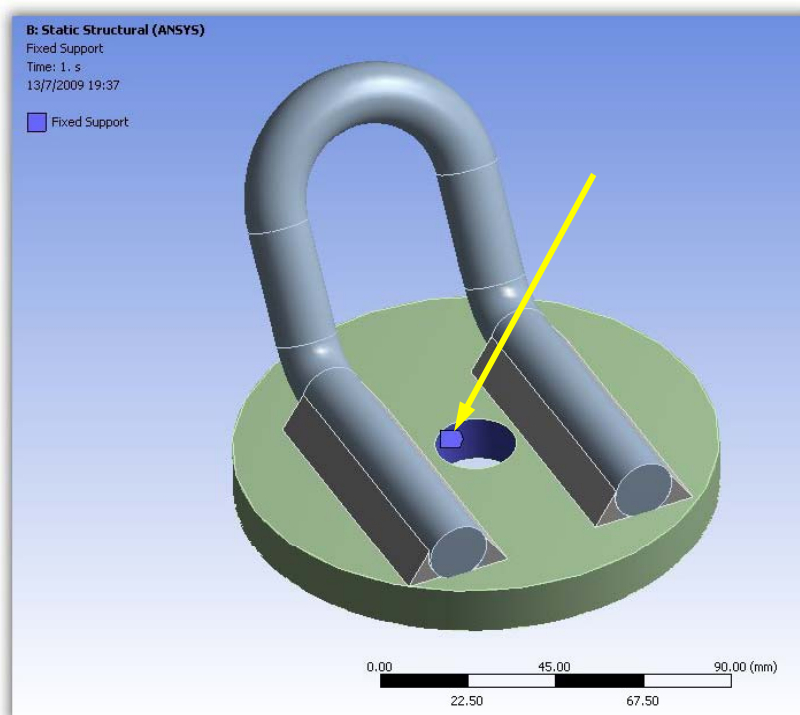


Figura 17 – Ponto de ancoragem do parafuso de fixação, onde apontado.

Considerando-se os mesmos esforços calculados no item 4.1 foram introduzidas as cargas sobre a alça metálica, como apresentado na figura a seguir.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

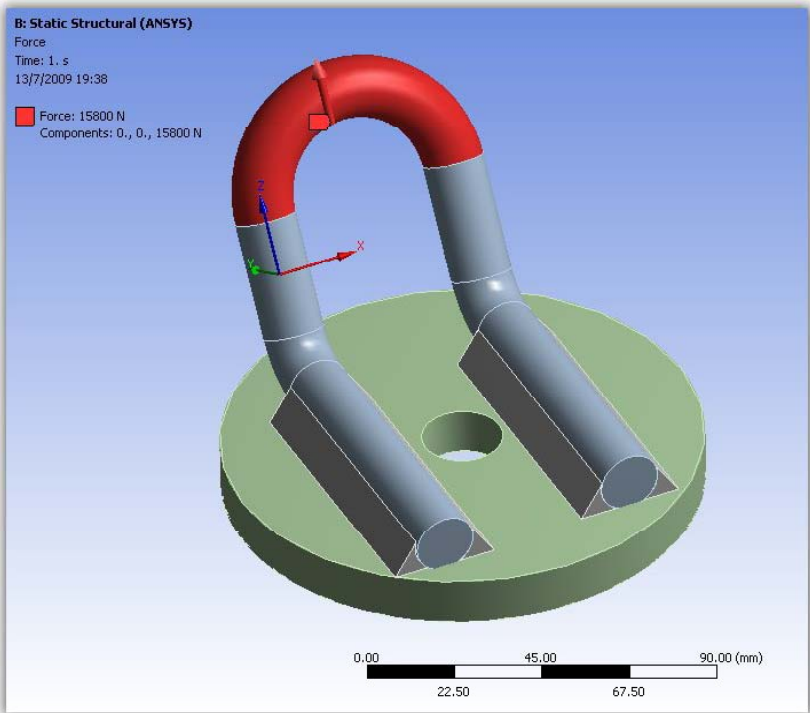


Figura 17 – Introdução das cargas no modelo sólido.

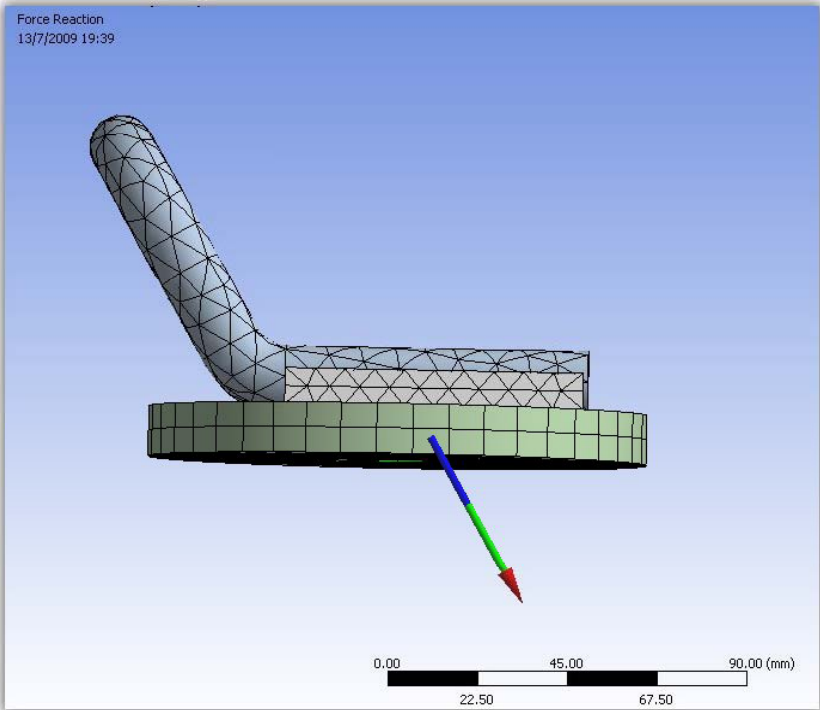


Figura 18 – Força resultante no parafuso de fixação.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

Uma vez introduzidas as cargas no modelo sólido, foi possível obter as tensões na seção mais solicitada da peça, conforme apresentado a seguir:

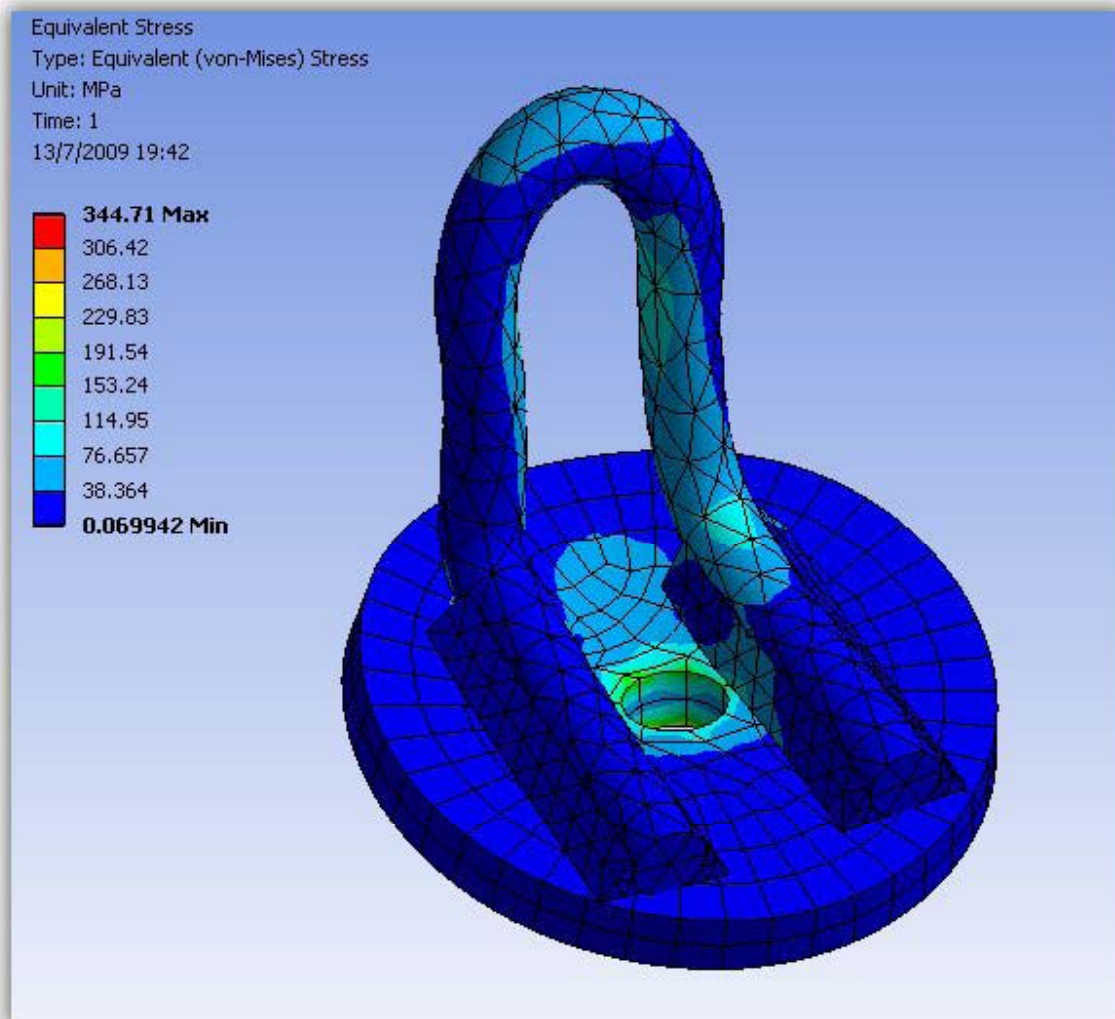


Figura 19 – Tensões de Von Mises (tensão equivalente).

Os resultados da análise da peça em elementos sólidos mostram que as tensões atuantes em algumas regiões do plano de ruptura eram superiores à tensão de escoamento do aço utilizado (CA-25, com tensão de escoamento de 250MPa). O resultado evidencia que a metodologia proposta em norma para dimensionamento de peças como aquela rompida não é válida. Tal conclusão corrobora o fato intuitivo de que a alça rompida não poderia ser dimensionada com base na tensão média na seção (tensão = força/área).

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

A equipe da perícia, analisando detidamente as fotos juntadas aos autos, em particular aquela apresentada na Figura 12 do presente artigo, verificou que não houve estrição da seção transversal da peça, ou seja, não houve escoamento do aço. Tal fato permitiu caracterizar o colapso ocorrido como uma ruptura do tipo frágil.

As características da ruptura ocorrida (ruptura frágil) em confronto com a tensão máxima na seção mais carregada da peça, inferior à tensão de escoamento do aço, possibilitou à equipe da perícia considerar como mais provável causa da ruptura a hipótese (ii) formulada, qual seja, **ocorrência de fadiga do material**, em virtude da peça ter atingido um determinado número de ciclos (carregamento/descarregamento).

A figura a seguir, extraída de software especial para análise de fadiga, corrobora a assertiva retro.

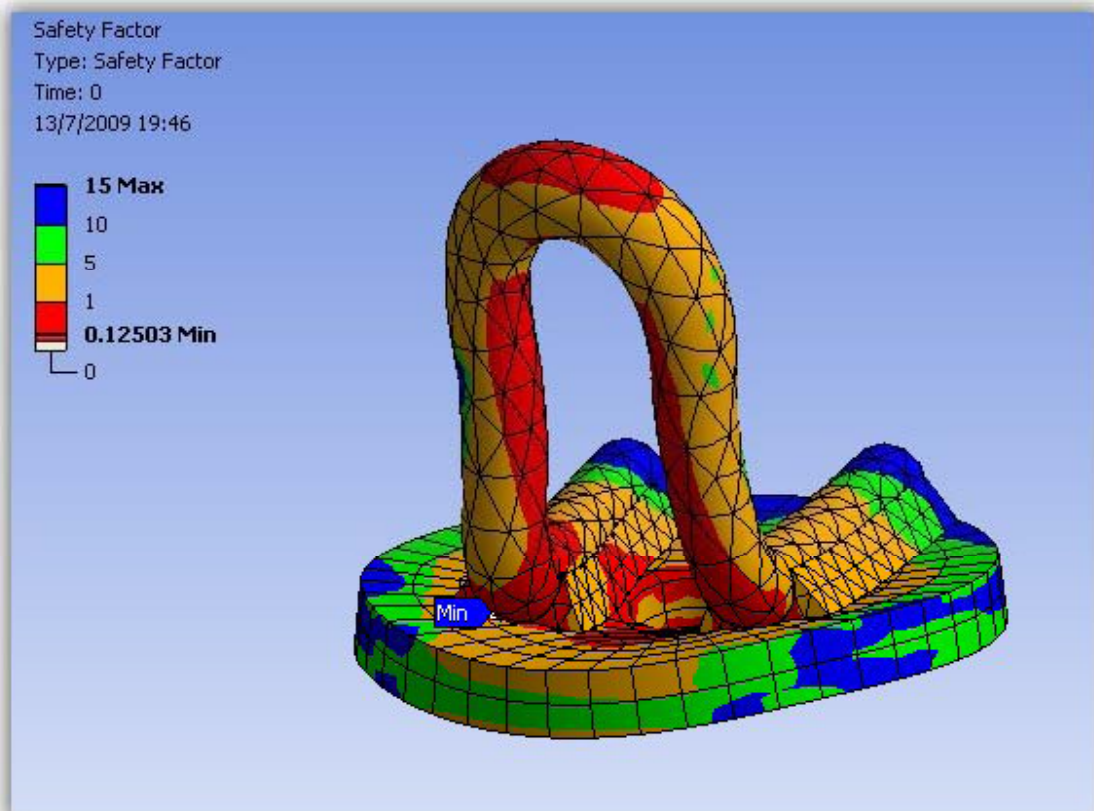


Figura 20 – Coeficiente de segurança à fadiga da peça analisada. O valor mínimo foi obtido exatamente para a seção que apresentou ruptura na peça objetivada pela perícia, indicada por “Min” na figura.

A figura supra apresenta um coeficiente à fadiga extremamente baixo para a região delimitada em vermelho, muito em particular para a região da dobra da alça junto à solda.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

A figura apresentada a seguir mostra o número de ciclos (carregamento – descarregamento) esperados para a ocorrência de ruptura. Nota-se que exatamente na dobra junto à solda o número de ciclos para a ruptura é o mínimo, de 625 ciclos, constituindo-se um valor bastante reduzido.

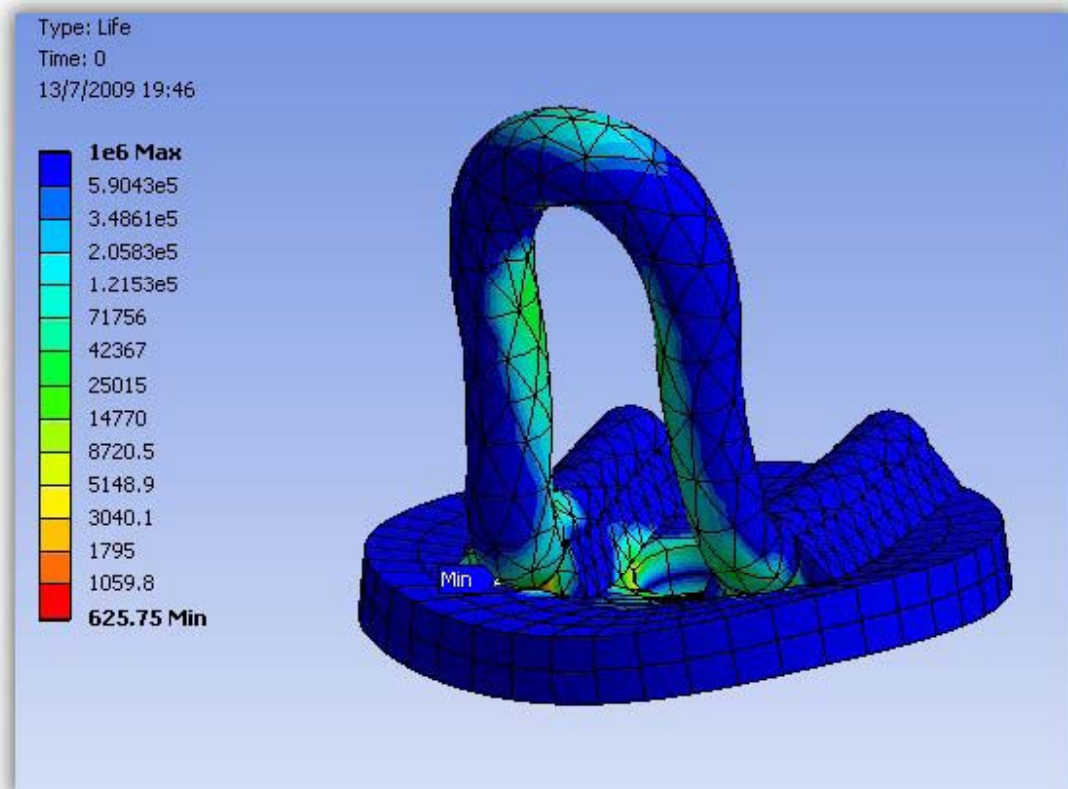


Figura 21 – Número de ciclos necessários para que seja atingida a ruptura. O valor mínimo foi obtido exatamente para a seção que apresentou ruptura na peça objetivada pela perícia, indicada por “Min” na figura.

A alternância do carregamento foi considerada segundo uma função senoidal como apresentada na figura abaixo, sendo:

Início e fim de cada ciclo : carga zero : descarregado.

Carga máxima aplicada á alça : 1 x 1580 kgf.

Devido às características funcionais da peça em questão , não há esforços compressivos na mesma, portanto é inexistente a inversão de cargas.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

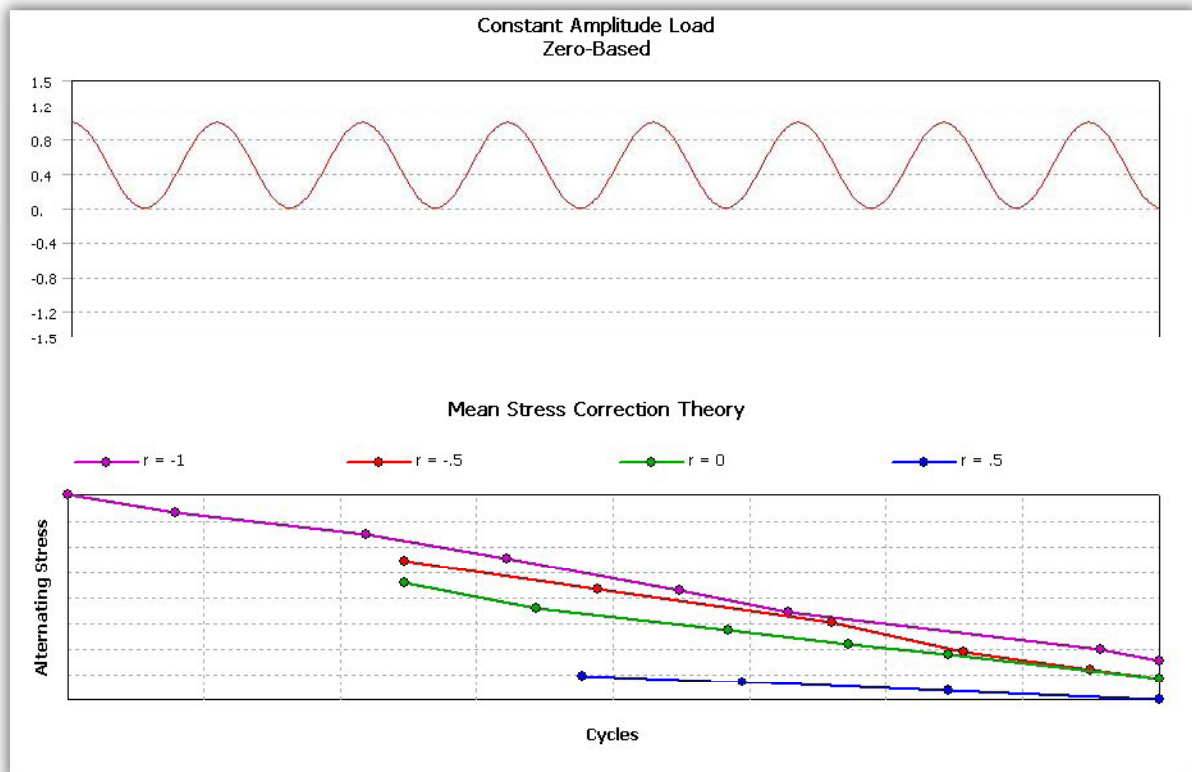


Figura 22 – Número de ciclos necessários para que seja atingida a ruptura. O valor mínimo foi obtido exatamente para a seção que apresentou ruptura na peça objetivada

Entre todas as simulações, para o caso considerado (carga variando de zero à carga máxima), sem que ocorra reversão de esforços, adotou-se $r = 0$ conforme gráfico acima.

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

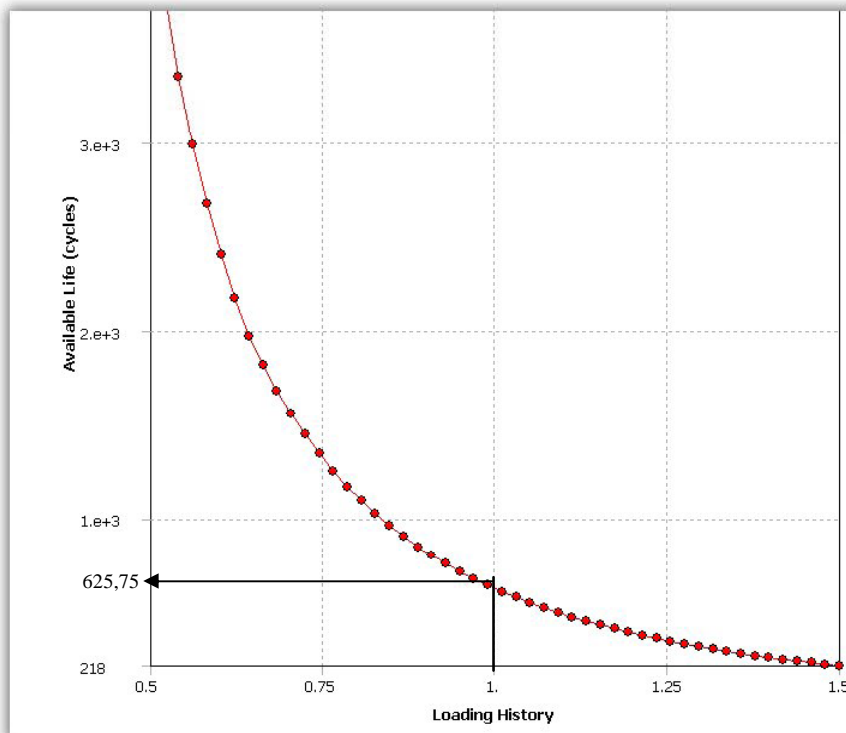


Figura 23 – Vida útil da peça em função da intensidade da carga (obs: intensidade 1x 1580kg resulta em 625,75 ciclos).

A equipe da perícia analisou o projeto da alça de içamento, o qual não contemplava qualquer especificação com relação ao tempo de uso (número de ciclos) da peça.

A empresa requerida também não possuía qualquer plano de substituição das peças utilizadas no sistema de içamento, a fim de evitar colapsos nos moldes daquele ocorrido.

Em vista das análises efetuadas pela equipe da perícia, a conclusão do Laudo Pericial foi a seguinte:

[...] Há evidências matemáticas e físicas de que a ruptura tenha ocorrido em decorrência da fadiga do material. Este fenômeno se manifesta através de ruptura frágil em peças sujeitas à cargas cíclicas, como era o caso da peça que provocou o acidente. Não há qualquer recomendação do fornecedor de tais peças a respeito do tempo de uso (número de ciclos) das alças metálicas [...]

XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009

A hipótese (iii), inobstante à impossibilidade de sua verificação, não conduziria a uma conclusão diversa daquela alcançada na perícia, haja vista que falhas de fabricação do material também poderiam propiciar a criação de fissuras na peça pelas quais se iniciaria a fratura da peça por fadiga. Além disso, como já mencionado, dentre as possíveis causas para o colapso ocorrido a falha de material vinha como menos provável.

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente artigo apresentou as análises efetuadas e as conclusões alcançadas pela equipe da perícia que estudou a ruptura de uma alça metálica constituinte do sistema de içamento de peças pré-moldadas.

Em função da não preservação da peça rompida, a equipe da perícia teve que recorrer à intensa verificação estrutural e modelagem computacional para poder fornecer algum subsídio ao Juízo.

No particular caso em questão, somente a verificação do dimensionamento mediante metodologia convencional não seria suficiente para dar suporte à conclusão do Laudo Pericial, de modo que a modelagem computacional foi imprescindível para o deslinde do feito.

Nesse sentido, os autores recomendam fortemente a utilização intensa da modelagem computacional nos diversos problemas objetivados pelas perícias de engenharia, hoje bastante facilitada pela diversidade de softwares disponíveis e pela grande capacidade computacional mesmo dos simples equipamentos de mesa.

**XV COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E
PERÍCIAS – IBAPE/SP - 2009**

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062: *Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado*. Rio de Janeiro, 1985.

EL DEBS, M. K. (2000) *Concreto Pré-Moldado: fundamentos e aplicações*, projeto REENGE – EESC/USP.

BLODGETT, O. (1958) *Design of welded structures*, Lincoln Electric Co.

STEPHENS, R.I., FATEMI, A., STEPHENS, R.R., FUCHS, H.O. (2001) *Metal Fatigue in Engineering*, 2^o Edition, John Wiley & Sons.