

ANÁLISE ESTRUTURAL EM COLHEDORA DE CANA

Rômulo Reis¹, Gabriel Gueller² e Mariana Batista³

¹Smarttech Serviços e Engenharia

E-mails: romulo.reis@smarttech.com.br, gabriel.gueller@smarttech.com.br,
mariana.batista@smarttech.com.br

RESUMO

A colheita mecanizada trouxe uma série de desafios para o agricultor e para os fabricantes de máquinas agrícolas. Do ponto de vista estrutural, a máquina deve ser suficientemente robusta para suportar todas as demandas inerentes ao seu uso. Para isso, a definição de cargas e condições de uso se premissas fundamentais para o desenvolvimento do produto. Assim, este trabalho tem como objetivo descrever as etapas e metodologia utilizadas para redefinição de um chassi de uma colhedora de cana-de-açúcar. Essas etapas vão da instrumentação no campo para a definição de cargas, através da análise de elementos finitos e otimização, e testes em laboratório para validação.

INTRODUÇÃO

Definição de critérios de projeto é um grande desafio para os desenvolvedores de máquinas agrícolas. O modo como o equipamento deve atuar a fim de cumprir seu desempenho funcional de colheita, manejo de solo e cultura é cuidadosamente planejado, porém do ponto de vista estrutural esses equipamentos ainda têm desafios a serem enfrentados. A diversidade de solos e culturas torna a determinação de esforços uma tarefa árdua. Sem o devido conhecimento dos esforços atuante na estrutura não é possível realizar um dimensionamento adequado, tornando os demais passos do desenvolvimento uma tentativa e erro baseado somente na experiência e intuição do projetista.



Figura 1: Colhedora Santal.

Esse trabalho irá mostrar em detalhes a metodologia de engenharia aplicada ao desenvolvimento de uma colhedora de cana desde o levantamento de cargas em campo passando pelo modelo de elementos finitos e laboratório até a validação em campo.

1. METODOLOGIA

A colhedora *base line* apresentava trincas prematuras entre 10% a 15% da vida desejada. Oito trincas principais eram recorrentes e foram estratégicas para o trabalho para a definição das curvas de fadiga assim como para instrumentação.

- O primeiro passo é determinar os carregamentos. A maneira mais prática para isso é realizando uma instrumentando uma máquina já existente com extensômetros e acelerômetros.
- As regiões da máquina a serem instrumentadas são indicadas por uma simulação de elementos finitos prévia, que indica a localização e a direção mais adequada para a colagem dos extensômetro.
- Após a instrumentação, rotas e manobras específicas são definidas para serem medidas nos mais diferentes tipos e densidades de plantio de cana. Essa etapa é definida em conjunto com a equipe de pós-venda que identifica aplicações e manuseio das mais diferentes formas e severidades.
- Com os resultados de medição é realizada a calibração entre o modelo de elementos finitos. Esta etapa é crucial para a qualidade das etapas seguintes, pois todas as modificações e tentativas de melhoria serão realizadas no modelo virtual.
- Com o modelo calibrado e com os carregamentos bem estabelecidos se inicia a etapa de melhoria do produto para que atenda os critérios de tensão para o objetivo de vida estabelecido.
- Após se definir a geometria do produto um primeiro protótipo é construído e levado para laboratório para um teste acelerado. Um primeiro teste acelerado é realizado no chassi *base line* a fim de se reproduzir as mesmas falhas de campo validando assim um formato de teste acelerado comprove a simulação virtual e reproduza uma condição de uso real do produto.
- Todas as etapas anteriores levam a um protótipo mais próximo do produto final, porém não eliminam por completo a chance de falha, apenas aumentam a chance de sucesso. Por esse motivo uma instrumentação final se torna conveniente para validação do sucesso do produto.

INSTRUMENTAÇÃO INICIAL

Antes da instrumentação um modelo de elementos finitos foi gerado para determinação dos pontos críticos Figura 2.

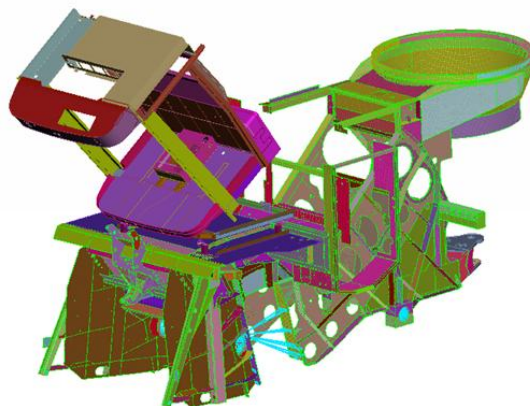


Figura 2: Modelo inicial.

As cargas utilizadas inicialmente possuíam valores genéricos, pois no momento a localização dos pontos críticos na estrutura e a direção da máxima tensão são mais importantes que sua magnitude. Quatro casos de carregamentos foram considerados inicialmente e são ilustrados na Figura 3:

- Carregamento vertical de gravidade 1g estático (próprio peso).
- Carregamento lateral de gravidade 1g (curva).
- Carregamento longitudinal de gravidade 1g (frenagem).
- Carregamento de torção do chassi (deslocamento de 10 milímetros em um dos quatro pontos de sustentação do veículo).

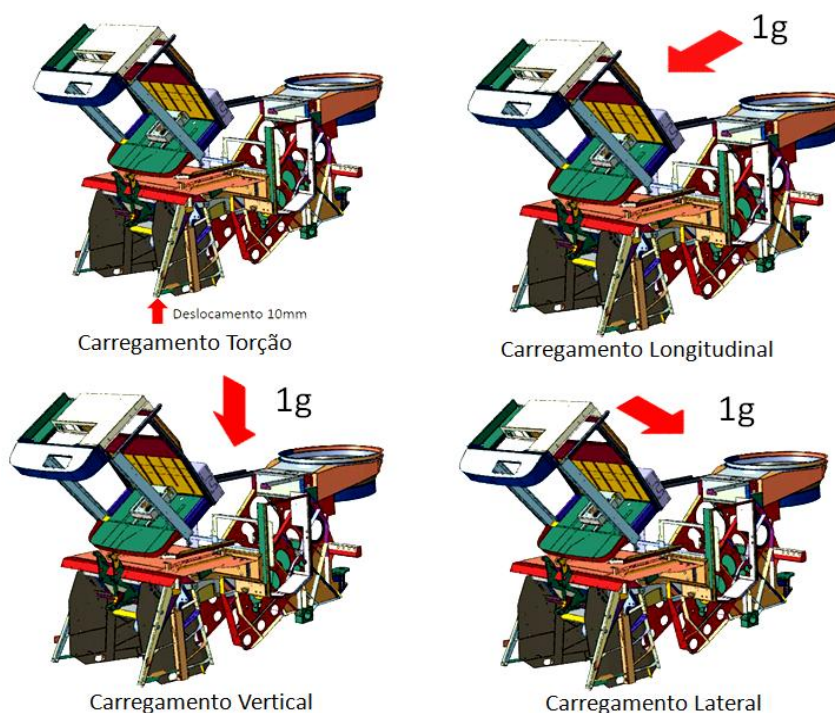


Figura 3: Casos de carregamento.

Os resultados das análises mostraram inicialmente que todos os pontos de falha foram representados predominantemente no carregamento de torção.

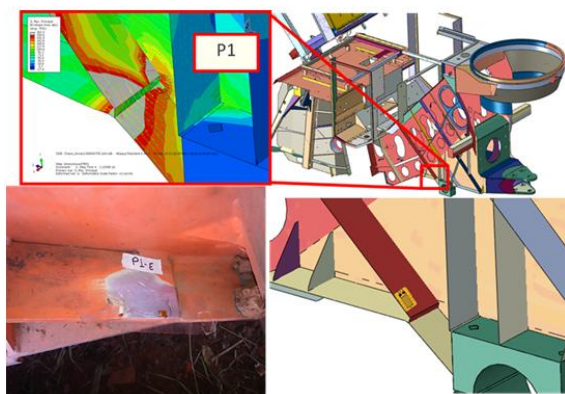


Figura 4: Ponto 1.

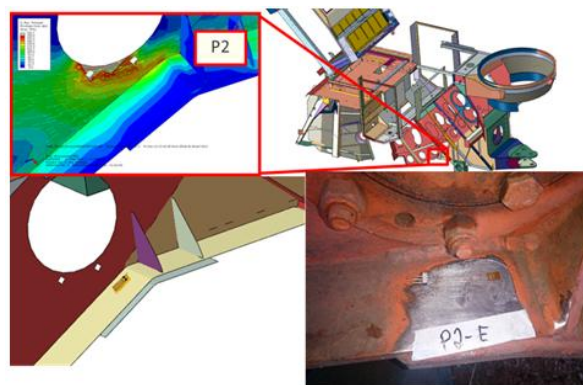


Figura 5: Ponto 2.

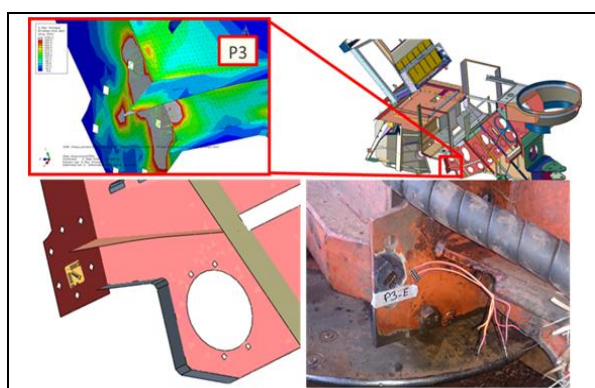


Figura 6: Ponto 3.

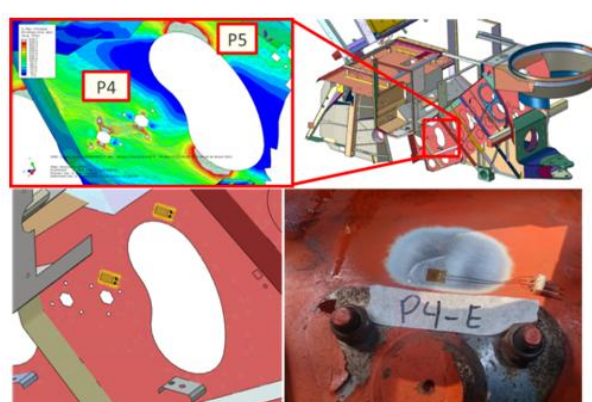


Figura 7: Ponto 4 e 5.

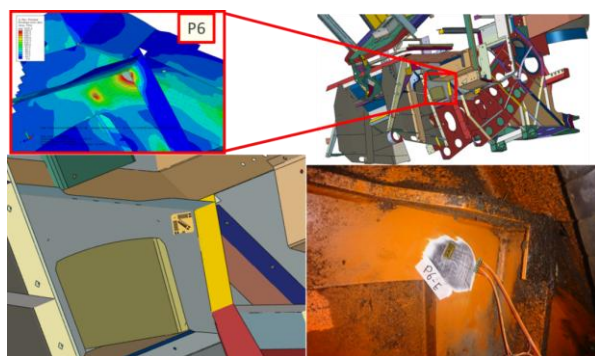


Figura 8: Ponto 6.

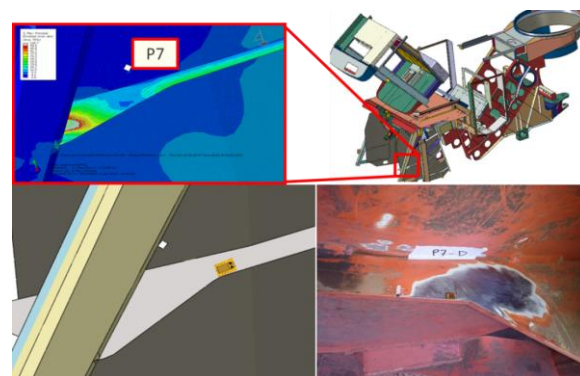


Figura 9: Ponto 7.

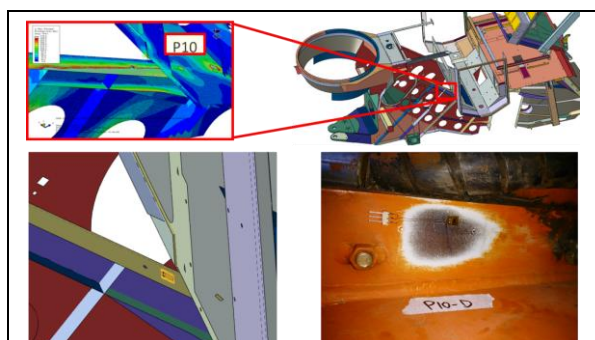


Figura 10: Ponto 10.

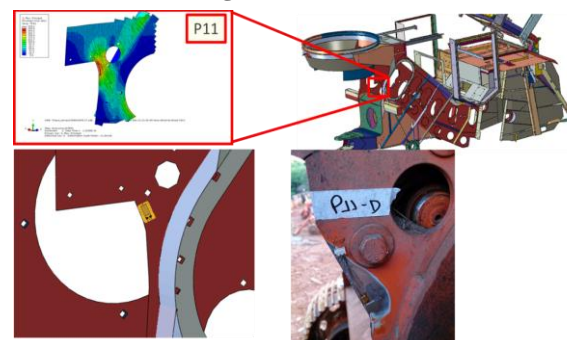


Figura 11: Ponto 11.

Os dados coletados são analisados e a contagem de ciclos é realizada através da ferramenta Rain Flow que identifica padrões de ciclos de histerese (fadiga) em um sinal randômico, a Figura 12 mostra esse processo.

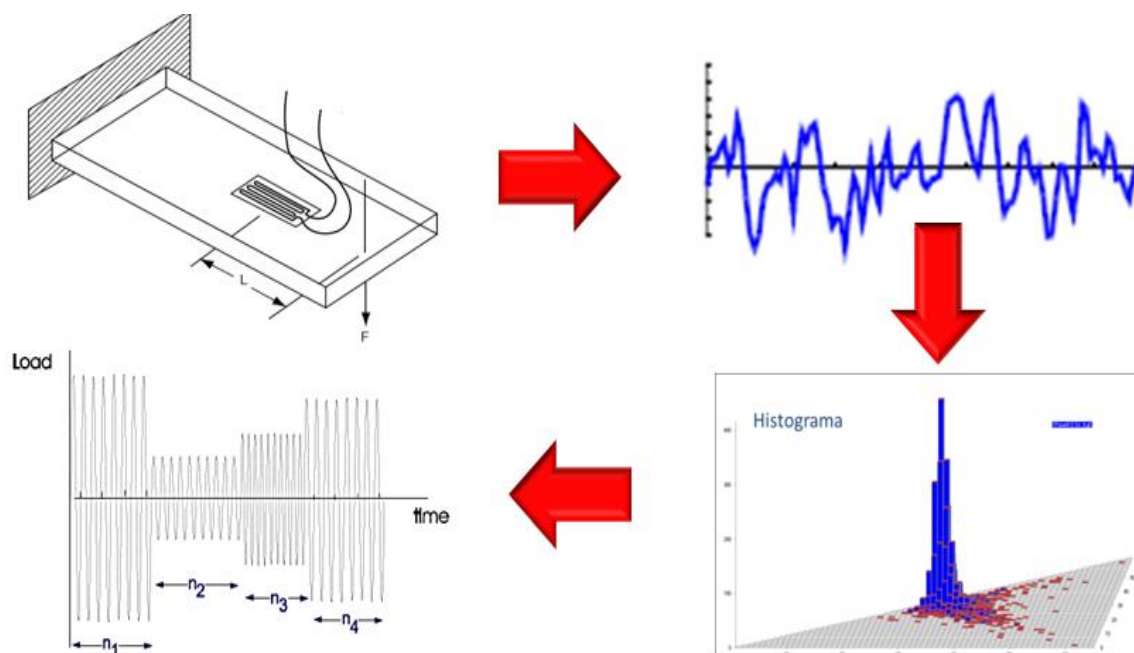


Figura 12: Processo de contagem de ciclos RainFlow.

Após a contabilização de ciclos o dano na estrutura foi calculado. A Tabela 1 mostra em vermelho o dano gerado na estrutura. Esse dano reflete a vida em campo para a maioria dos pontos.

Tabela 1: Dano nos pontos instrumentados.

MODELO ATUAL	N.Repetições	1-PTO 01 D/uStrain	2-PTO 01 E/uStrain	3-PTO 02 D/uStrain	4-PTO 02 E/uStrain	5-PTO 03 L/uStrain	6-PTO 03 T/uStrain	7-PTO 03 V/uStrain	8-PTO 04/uStrain	9-PTO 05/uStrain	10-PTO 06 L D/uStrain	11-PTO 06 T D/uStrain	12-PTO 06 V D/uStrain
COLHEITA1_SE_F.Tem	37217	1.20E-03	1.83E-03	1.00E-02	1.39E+00	1.65E-01	6.64E-02	5.49E-03	1.19E-02	1.78E-02	2.46E+00	1.03E-01	2.97E-01
COLHEITA2_SE_F.Tem	53281	1.14E-03	1.30E-03	6.16E-03	1.07E+00	3.82E-01	1.55E-01	1.37E-02	9.25E-03	1.63E-02	2.41E+00	9.65E+00	4.03E-01
COLHEITA3_SE_F.Tem	48183	1.22E-03	1.68E-03	9.37E-03	1.29E+00	2.49E-01	1.06E-01	7.51E-03	1.06E-02	8.89E-03	2.75E+00	1.16E-01	3.56E-01
COLHEITA4_SE_F.Tem	72671	2.50E-03	2.52E-03	1.40E-02	2.27E+00	6.96E-01	2.96E-01	4.32E-02	1.95E-02	6.03E-01	3.34E+00	1.33E-01	6.79E-01
COLHEITA5_SE_F.Tem	63762	2.91E-03	2.40E-03	2.26E-02	2.82E+00	4.89E-01	2.19E-01	2.71E-02	2.34E-02	5.29E-01	3.61E+00	1.58E-01	4.92E-01
COLHEITA6_SE_F.Tem	89978	3.94E-03	4.20E-03	2.17E-02	3.61E+00	7.35E-01	3.00E-01	4.42E-02	2.99E-02	7.47E-01	4.96E+00	2.06E-01	8.92E-01
COLHEITA1_mudança_acelerometro_SE_F.Tem	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
TRANSPORTE1_SE_F.Tem	99510	2.72E-03	5.52E-03	1.30E-02	3.13E+00	1.92E-01	5.89E-02	1.23E-02	2.20E-02	5.51E-02	4.87E+00	2.02E-01	7.86E-01
TRANSPORTE1P1_SE_F.Tem	68949	2.05E-03	3.33E-03	1.14E-02	2.72E+00	5.64E-02	2.02E-02	1.29E-03	1.83E-02	6.85E-02	3.97E+00	1.55E-01	5.65E-01
TRANSPORTE2_SE_F.Tem	76232	5.31E-03	2.64E-03	7.69E-03	2.61E+00	3.04E-01	1.56E-01	9.71E-03	2.06E-02	6.33E-01	3.57E+00	1.37E-01	6.51E-01
ESTEIRA-TRANSBORDO_SE_F.Tem	16641	1.13E-03	3.96E-04	8.59E-04	1.69E-01	2.59E-02	1.19E-02	5.88E-04	1.58E-03	1.38E-01	3.99E-01	1.61E+00	8.23E-02
BASCULAMENTO_SE_F.Tem	15763	0.00E+00	0.00E+00	5.32E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.54E-06	6.21E-05	5.02E-06
TOTAIS	dano	0.02	0.03	0.12	21.07	3.29	1.39	0.17	0.17	2.82	32.34	132.21	5.20
	vidas	41.49	38.75	8.56	0.05	0.30	0.72	6.06	5.98	0.35	0.03	0.01	0.19
	ANOS (SIT. ATUAL)	414.9	387.5	85.6	0.5	3.0	7.2	60.6	59.8	3.5	0.3	0.1	1.9

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Com os dados de campo foi possível calibrar um valor de carregamento de torção que representa os pontos de falha. A Figura 13 mostra a força calibrada.



Figura 13: Carregamento de torção.

A Figura 14 mostra o resultado de tensão para o critério estabelecido de 130MPa para solda e 160MPa para chapa plana. As regiões em cinza estão acima do critério.

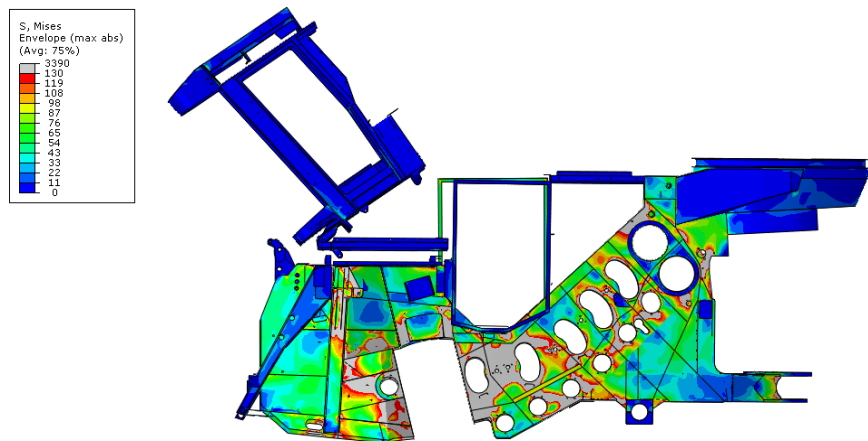


Figura 14: Resultado chassi *base-line*.

Após uma série de iterações de melhorias em parceria com a engenharia de produto obteve-se uma configuração de chassi que virtualmente atende o critério de tensão. A Figura 15 uma visão geral do chassi otimizado.

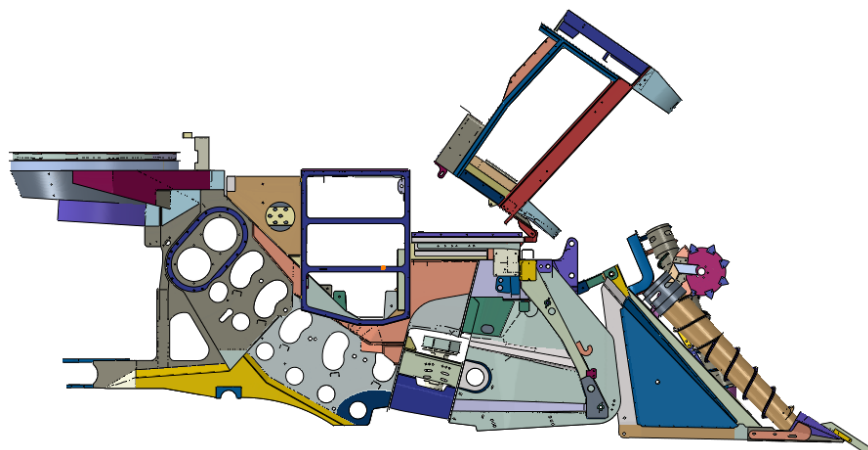


Figura 15: Estrutura Otimizada

A Erro! Fonte de referência não encontrada. mostra o resultado de tensão do modelo otimizado.

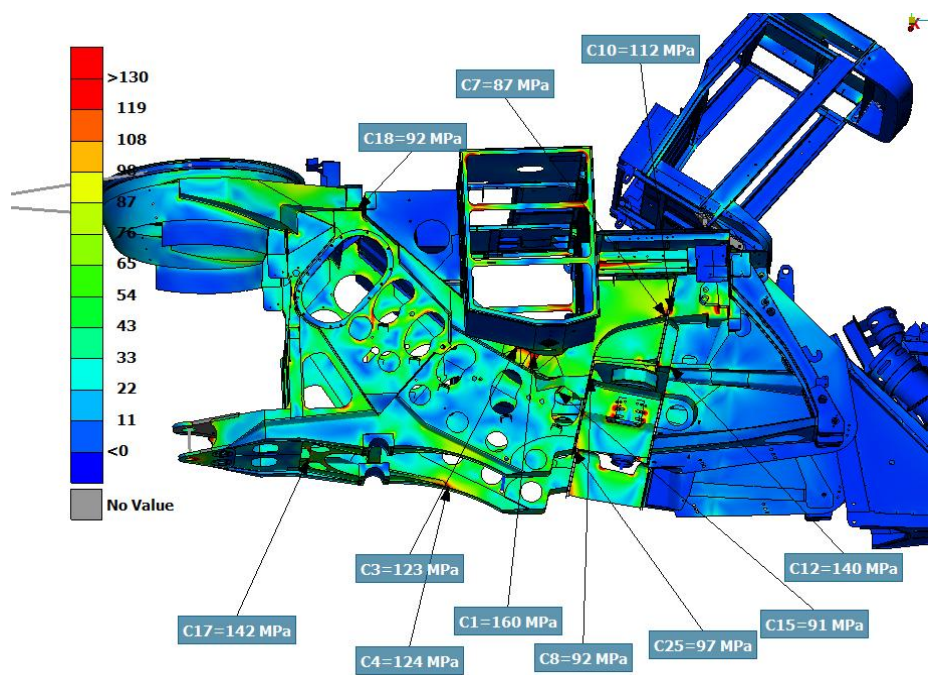


Figura 16: Resultado de tensão modelo otimizado.

A Tabela 2 mostra o resultado de tensão do modelo otimizado. Sendo que a última coluna mostra a margem de segurança em relação ao critério.

Tabela 2: Tensão modelo otimizado.

		FEA STRESS	LOAD [g]	MATERIAL FATIGUE CURVE		SAFETY MARGIN
		[1g]	1.00	LIMIT	MATERIAL K	
POINT	MATERIAL		STRESS [Mpa]	[Mpa]		
C1	PLAIN	160	160	160	5	0%
C2	PLAIN	147	147	160	5	9%
C3	CC2	123	123	130	3	5%
C4	CC2	124	124	130	3	5%
C5	CC2	122	122	130	3	7%
C6	CC2	85	85	130	3	54%
C7	CC2	87	87	130	3	50%
C8	CC2	92	92	130	3	41%
C9	CC2	72	72	130	3	80%
C10	CC2	112	112	130	3	16%
C11	CC2	81	81	130	3	61%
C12	PLAIN	140	140	160	5	14%
C13	PLAIN	149	149	160	5	8%
C14	CC2	124	124	130	3	5%
C15	CC2	91	91	130	3	43%
C16	PLAIN	136	136	160	5	17%
C17	PLAIN	142	142	160	5	12%
C18	CC2	92	92	130	3	41%
C19	CC2	104	104	130	3	25%
C20	CC2	127	127	130	3	2%
C21	CC2	109	109	130	3	19%
C22	CC2	110	110	130	3	18%
C23	CC2	100	100	130	3	30%
C24	CC2	118	118	130	3	11%
C25	CC2	97	97	130	3	34%

3. TESTE ACELERADO EM LABORATÓRIO

A fim de validar as hipóteses de cálculo e prever alguma outra falha antes da colhedora ir a campo um teste acelerado em laboratório foi elaborado. Porém antes de testar o chassi otimizado foi realizado um teste no chassi *base line* a fim de reproduzir as falhas de campo.

A Figura 17 mostra o chassi *base line* sendo ensaiado. O teste acelerado foi realizado aumentando-se a amplitude do carregamento de acordo com a regra de Miner utilizando curvas de fadiga obtidas com o teste de campo associado com o histórico de falha.



Figura 17: Ensaio chassi *base line*.

A Figura 18 mostra as trincas que surgiram em laboratório.



Figura 18: Trincas chassi *base line*.

Seguindo o mesmo procedimento do teste mostrado anteriormente um novo protótipo de chassi foi testado. O ensaio seria considerado se o teste durasse 50 horas com carregamento igual ao do teste anterior com frequência de 0,5Hz.



Figura 19: Teste chassi otimizado.

Mesmo com todos os procedimentos realizados anteriormente duas falhas surgiram durante o teste em laboratório.



1



2

Figura 20: Falhas chassi otimizado.

A falha número 1 surgiu por questões de má qualidade de solda como mostrado na onde mostra a diferença entre os cordões de solda em lados simétricos. Já a falha 2 nos parafusos que une duas partes do chassi houve um erro no grau dos parafusos.



Figura 21: Diferença entre solda e lados simétricos.

4. TESTE DE VALIDAÇÃO

Os pontos críticos da simulação foram instrumentados no protótipo de campo.



Figura 22: Ponto 1.



Figura 23: Ponto 2.



Figura 24: Ponto 3.



Figura 25: Ponto 4 e 5.



Figura 26: Ponto 6.



Figura 27: Ponto 7.



Figura 28: Ponto 9.



Figura 29: Ponto 11.



Figura 30: Ponto 14.



Figura 31: Ponto 15.

A Tabela 3 mostra os resultados de dano acumulado dos pontos instrumentados.

Tabela 3: Resultado de dano acumulado.

	MATERIAL	SOLDA	SOLDA	SOLDA	SOLDA	SOLDA	SOLDA	SOLDA	CHAPA	SOLDA	SOLDA	SOLDA
MODELO ATUAL	N.Repetições	S01	R02_V	R02_T	R02_L	R03_V	R03_T	R03_L	S04	S05D	R05E_V	R05E_T
COLHEITA1	3773	8.54E-02	8.26E-03	4.02E-03	4.65E-04	1.33E-02	3.48E-02	1.99E-03	1.64E-04	6.35E-04	8.89E-04	4.73E-03
COLHEITA2	4427	9.69E-02	9.12E-03	5.11E-03	5.34E-04	1.30E-02	3.54E-02	2.32E-03	1.89E-04	6.96E-04	1.02E-03	5.23E-03
COLHEITA3	5429	1.25E-01	1.22E-02	5.77E-03	8.64E-04	1.34E-02	3.81E-02	2.47E-03	2.42E-04	7.50E-04	1.31E-03	6.55E-03
TRANSPORTE	8264	1.50E-01	1.40E-02	7.34E-03	7.26E-03	1.71E-02	4.92E-02	2.22E-03	2.70E-04	9.98E-04	1.46E-03	9.76E-03
TOTAIS	dano	0.46	0.04	0.02	0.01	0.06	0.16	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03
	vidas	2.2	23.0	45.0	109.6	17.6	6.3	111.2	1155.0	324.8	213.6	38.1
	ANOS	10.9	114.8	224.8	548.0	88.1	31.7	555.9	5774.8	1624.0	1068.1	190.3

	MATERIAL	SOLDA	SOLDA	SOLDA	SOLDA	SOLDA	SOLDA	SOLDA	SOLDA	CHAPA	SOLDA
MODELO ATUAL	N.Repetições	S06D	S06E	S07D	S07E	S09	R11_V	R11_T	R11_L	S14	S15
COLHEITA1	3773	5.63E-02	6.42E-02	3.29E-03	8.27E-02	1.01E-03	9.30E-04	3.62E-02	2.91E-02	8.21E-02	6.03E-04
COLHEITA2	4427	6.36E-02	6.67E-02	3.81E-03	9.81E-02	1.12E-03	1.28E-03	5.33E-02	4.28E-02	1.29E-01	6.49E-04
COLHEITA3	5429	8.22E-02	8.71E-02	4.06E-03	1.18E-01	1.13E-03	1.80E-03	6.87E-02	5.99E-02	1.83E-01	4.61E-04
TRANSPORTE	8264	9.86E-02	1.03E-01	3.64E-03	1.45E-01	1.87E-03	1.13E-03	5.30E-02	4.20E-02	1.25E-01	3.41E-04
TOTAIS	dano	0.30	0.32	0.01	0.44	0.01	0.01	0.21	0.17	0.52	0.00
	vidas	3.3	3.1	67.6	2.3	194.4	194.7	4.7	5.8	1.9	486.9
	ANOS	16.6	15.6	337.8	11.3	972.1	973.7	23.7	28.8	9.6	2434.6

CONCLUSÃO

A metodologia de trabalho se mostrou eficiente para a elaboração e desenvolvimento de um novo produto.

A medição inicial em um produto *base line* é a maneira mais prática para se levantar os esforços de campo. A simulação de elementos finitos no auxílio da direção de colagem dos extensômetros se torna interessante não só para diminuir o número de canais de medição, mas principalmente dar uma ideia inicial do comportamento global da estrutura.

Com o resultado das medições consegue-se calcular o dano na estrutura e também com o auxílio do modelo de elementos finitos realizar uma calibração que torna a estrutura um dispositivo de medição de carregas.

A etapa de otimização virtual é bastante trabalhosa e passa por uma série de iterações que depende muito do bom relacionamento entre engenharia de produto e engenharia de cálculo. O chassi teve um aumento de peso de 30% porém sua expectativa de vida passou de uma média de 1200h para 15000 horas.

Os ensaios acelerados de laboratório são de extrema importância para validação do protótipo. De maneira rápida e econômica é possível ter uma excelente perspectiva do desempenho do produto em campo. Esse ensaio trouxe uma redução de 15000 horas para 50 horas. Algumas falhas ocorreram nessa fase, porém como mencionado na Seção 3 as falhas foram de manufatura e não de projeto.

O ensaio de campo confirmou que os danos em cada ponto medido estão dentro do limite de estimado e simulação.

Assim conclui-se que a metodologia aplicada é robusta o suficiente para o desenvolvimento de produtos e com o passar do tempo o conhecimento sobre o produto se torna maior e a tendência é que o desenvolvimento se torne cada vez mais aperfeiçoada.

REFERÊNCIAS

- [1] LEE, Y.; PAN, J.; HATHAWAY, R.; BARKEY, M. Fatigue Testing and Analysis. Elsevier, Press, 2005. 402pp.
- [2] LITTLE, R.E. & EKVALL, J.C. Statistical Analysis of Fatigue Data. American Society for Testing and Materials, ASTM, 1979. 141PP.
- [3] WONG, J.T. Theory of Ground Vehicles. 3 ed. John Wiley, 2001. 528pp.