

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO DE CHAPAS DE ALTO FORNOS NA TERNIUM BRASIL*

Alexandre Augusto Andrade da Silva¹
Alexandre da Silva Damásio²
Alexandre Patrício Vieira da Silveira³
Eustáquio Vieira Júnior⁴
Pedro Lima de Sousa⁵
Sandro Valério Maia Larrubia⁶

Resumo

Elementos estruturais como um Alto Forno são estruturas bastante complexas que podem ser submetidas a cenários de sobreaquecimento que são bastante similares a eventos de incêndio de estruturas civis. Esta semelhança pode gerar consequências extremamente danosas para unidades produtivas devido à importância e sobretudo as dimensões e cargas aplicadas, que ultrapassam centenas de toneladas. Este estudo prima por determinar todas as características de uma instalação real, demonstrando todas as variáveis de engenharia necessárias para tal e os comportamentos mecânicos advindos das cargas térmicas aplicadas em diversos cenários de sobreaquecimento. Serão discutidas as fragilidades de projetos de estruturas Auto-Portante em um cenário Siderúrgico e apresentadas propostas de melhorias para condições previamente expostas.

Palavras-chave:Alto Forno; Limpeza de Gás; Uptake&Downcomer

INFLUENCE OF TEMPERATURE IN THE BEHAVIOR OF BLAST FURNACE PLATES AT TERNIUM BRAZIL

Abstract

Structural elements such as a Blast Furnace are quite complex structures that can be subjected to overheating scenarios that are quite similar to fire events of civil structures. This similarity can generate extremely damaging consequences for productive units due to the importance and above all the dimensions and loads applied, which exceed hundreds of tons. This study evaluates all the characteristics of a real installation, demonstrating all the engineering variables required for this and the mechanical behavior of the thermal loads applied in various overheating scenarios. We will discuss the weaknesses of projects of Free Standing structures in a steel scenario and presented proposals for improvements to previously exposed conditions.

Keywords: Blast Furnace, Gas Cleaning; Uptake &Downcomer;

- ¹ Eng. Mecânico, Eng. Mecânico Especialista, Engenharia Alto Fornos, Ternium Brasil
- ² Técnico Mec., Técnico Mecânico S., Coordenação de Preservação do Alto Forno, Ternium Brasil
- ³ Eng. Eletricista, Técnico Especialista, Coordenação de Preservação do Alto Forno, Ternium Brasil
- ⁴ Eng. Metalúrgico; Eng. Processos; Coordenação de Preservação do Alto Forno, Ternium Brasil
- ⁵ Eng. Metalúrgico; Eng. Trainee; Coordenação de Preservação do Alto Forno, Ternium Brasil
- ⁶ Eng. Produção; Técnico Especialista; Coordenação de Preservação do Alto Forno, Ternium Brasil

1 INTRODUÇÃO

Quando se inicia um dimensionamento de elementos estruturais é fundamental e (obrigatório, pela norma NBR 8681) que sejam definidos os Estados Limites (critério de aceitação ou não do resultado), e também os tipos de ações que esta estrutura emprega, seja sobrecargas, eventos excepcionais e o simples peso próprio dos componentes empregados.

Todas estas definições têm que ser (novamente, obrigatoriamente) “bem” descritas, pois quando se instala uma estrutura, a mesma encontra-se submetida a um estado plano de tensões e respectivamente também a um estado de deformações, figura 1. O equilíbrio, dentro da resistência característica de cada componente individual pelo método de estado limite escolhido é o que garantirá a permanência destes elementos da maneira que se projetou e dentro do grau de segurança determinado.

Entretanto, quando há um evento excepcional e catastrófico como um incêndio ou sobreaquecimento à elevadas temperaturas (objetivo deste trabalho), observa-se que os elementos ficam submetidos há um aquecimento diferencial que, por conseguinte, gera uma mudança no estado de tensões inicialmente encontrado na instalação. Esta nova solicitação sobrepõe-se ao estado inicial e passa a crescer significativamente no comportamento dos elementos individualmente, podendo ser sentido, dependendo da devida concentração, em maior ou menor intensidade. Como Elementos estruturais são componentes interligados, pode-se encontrar colapsos em elementos que estavam devesas afastados das regiões submetidas a eventos de sobreaquecimento. Isto pode ser explicado devido a mudança no estado de tensão inicial, podendo este ser gerado pelas as diversas dilatações térmicas unitárias envolvidas que são restringidas ou mesmo, a própria confecção de um “novo” estado de deformação variável no tempo, após a sobreposição de tensões iniciais.

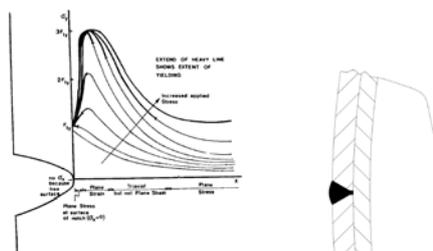


Figura 1 – Plano de Tensão e Deformação em entalhes [1]

Há também mais duas outras “variáveis” que surgem em situações de elevação de temperatura e que são ainda mais danosas e perigosas a instalações. São a perda de resistência com a elevação da temperatura (degradação térmica) e o mecanismo de subida de discordâncias (mais conhecido como Fluência ou Creep). A quase maioria dos materiais quando submetidos a incremento de temperatura apresentam profundas alterações em suas principais propriedades, como a Tensão de Escoamento, Ruptura, Tenacidade e nº ciclos à fadiga. Estas alterações são aprofundadas com a gradiente de temperatura encontrado nos elementos e gera severa instabilidade em estruturas, um exemplo é a excepcional perda de tensão como expressa na figura 2.

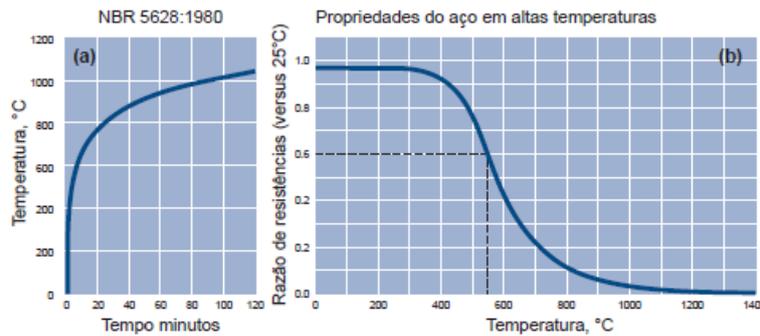


Figura 2 – Diminuição da resistência do ASTM A 36 sobre degradação térmica [2]

Além dos grandes danos que a degradação térmica pode gerar em elementos estruturais interligados, há o comportamento gerado pela Fluência, com aumento da deformação dos elementos após a imposição continuada de temperatura e da geração de vazios durante o estágio de subida de discordância, como mostra a figura 3.

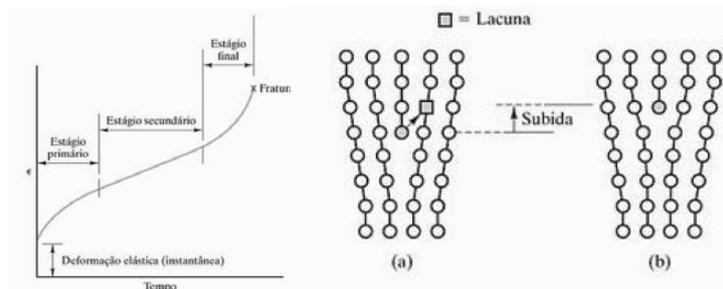


Figura 3 – Curva de Fluência, ilustração dos estágios com as respectivas deformações e explicação simplificada do mecanismo de subida de discordância [2]

2 DESENVOLVIMENTO

2.1. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1.1. MODELO NORMATIVO DE INCÊNDIO EM ESTRUTURAS CIVIS

Como eventos catastróficos como incêndios e elevações de temperaturas são situações que poderão ocorrer durante a “vida” da instalação projetada, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) entre outras instituições normativas internacionais, criaram exigências técnicas de modo que os projetos possam mitigar as consequências destes eventos e imbuir mais segurança nas instalações. Ações como a instrução normativa ABNT NBR 14432, que preconiza por categorizar entre os dois tipos de proteção (ativa ou passiva), desenvolveu o conceito de incêndio-padrão, equação 1, conceito este que permeia todos os critérios das normas NBR 5628, 14323 e a própria 14432 e é fundamental para o cálculo de estruturas em sobreaquecimento/ incêndio. De posse deste conceito, foi possível a criação do critério intitulado de Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), figura 4, que para diversos tipos de instalações é uma variável obrigatória para a confecção de estruturas e projetos de proteção para cenários de sobreaquecimento/ incêndio.

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \times \log(8t + 1) \quad (1)$$

Onde.:

t é o tempo, em minutos

θ_0 é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento;

θ_g é a temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t.

Tabela A.1 – Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), em minutos

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo				Altura *
			Classe S ₁ h _s > 10 m	Classe S ₂ h _s ≤ 10 m	Classe P ₁ h ≤ 6 m	Classe P ₂ 6 m < h ≤ 12 m	
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	12 m
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	
		G-1 e G-2 abertos	90	60 (30)	30	30	

Figura 4 – Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), NBR 14432

Outra variável importante para a confecção de projetos que resistem à sobrequecimento/ incêndios e conseqüentemente ao TRRF determinado é o Fator Massividade (m^{-1}), que é um fator geométrico que pode ser definido como mostra nas figuras 5 e 6 que influencia significativamente no tempo de aquecimento dos componentes, conforme demonstrado na figura 7.



Figura 5 – Perfis W150x13 e W610x174, massividade pode variar entre 400 m^{-1} (W150x13) à 70 m^{-1} (W610x174) dependendo do cenário [3];

Tabela 6 - Fator de massividade para alguns elementos estruturais sem proteção		Tabela 7 - Fator de massividade para alguns elementos estruturais com proteção		
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da seção transversal}}$	<p>Seção tubular de forma circular exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{d}{t(d-t)}$	Situação	Descrição	Fator de massividade (m^{-1})
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{\text{perímetro exposto ao incêndio}}{\text{área da seção transversal}}$	<p>Seção tubular de forma retangular (ou seção caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{b+d}{t(b+d-2t)}$		Seção com proteção tipo contorno de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço}}{\text{área da seção da peça de aço}}$
			Seção com proteção tipo caixa, de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{2(d+c_1+b+c_2)}{\text{área da seção da peça de aço}}$
			Seção com proteção tipo contorno, de espessura uniforme exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço} - b}{\text{área da seção da peça de aço}}$

Figura 6 – Critérios de massividade pela NBR 14323

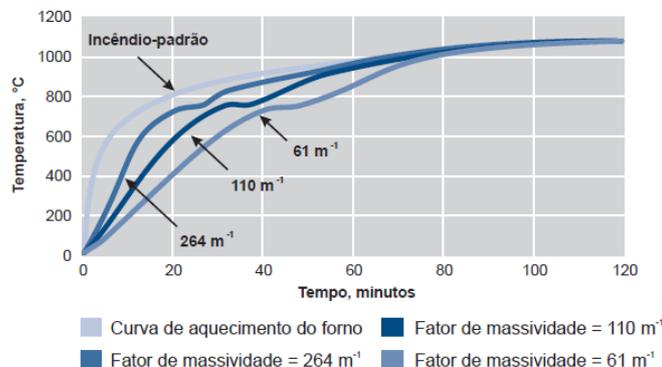


Figura 7 – Modelo de 3 diferentes perfis estruturais e suas curvas de aquecimento devido a diferença de Fator Massividade [3]

Por meio destes critérios normatizados, é possível então confeccionar estruturas com proteções já instaladas de modo a mitigar as consequências destes cenários de sobreaquecimento/ incêndios catastróficos, como exemplificado nas figuras 8 e 9.

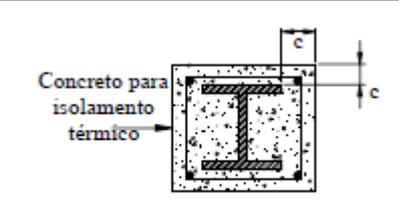
	Tempo requerido de resistência ao fogo (min)			
	30	60	90	120
Cobrimento de concreto c (mm)	0	25	30	40

Figura 8 – Exemplo de solução como cobrimento de concreto com função de apenas isolamento térmico, como prescrito pela NBR 14323

Fator de massividade	Espessura seca, em mm, para fornecer um TRRF (minutos) de			
	30	60	90	120
30	10	10	10	12
50	10	10	13	16
70	10	10	15	20
90	10	12	17	22
110	10	13	18	24
130	10	14	19	25
150	10	14	20	27
170	10	15	21	28
190	10	15	22	29

Figura 9 – Exemplo de espessura de refratário (Non reactive Coating), para atingimento do TRRF, adaptação de [3] conforme Yellow Book da Association for Specialist Fire Protection

2.1.2. MODELO DO CASO PRÁTICO NO ALTO FORNO

Como foi expresso, há miríades de estudos e documentos normativos quanto a efeitos de sobreaquecimento em elementos estruturais civis, tais como prédios e galpões. Por meio destes é possível de maneira mais segura dimensionar estruturas para cenários de sobreaquecimento por até 120 min. Sendo 120 min o limite máximo da norma, pois pela curva de incêndio padrão, são encontradas temperaturas acima de 1000°C após este período de aquecimento.

Entretanto, quando o cenário é uma estrutura metálica composta de elementos não normatizados, tais como um Alto Forno, a aplicação destes preceitos não é possível (não há “ábacos” para seções complexas e estudos empíricos para uma determinação padronizada de tempos de aquecimento e mesmo a utilização da equação analítica de Fluência, também não se aplica, devido ao aquecimento diferencial em pontos distintos que cenários de sobreaquecimento geram). Portanto, foi necessário procurar por alternativas para desenvolver soluções que possam quantificar estes eventos e garantir a segurança dos colaboradores e de toda a instalação.

Este presente trabalho buscou por demonstrar cenários de sobreaquecimento em uma região do Alto Forno intitulada Tubulação da Limpeza de Gás que encontra-se instalada na planta siderúrgica do Rio de Janeiro da Ternium Brasil, e os preceitos

de engenharia confeccionados para a avaliação e mitigação dos riscos associados a eventos de Altas Temperaturas.

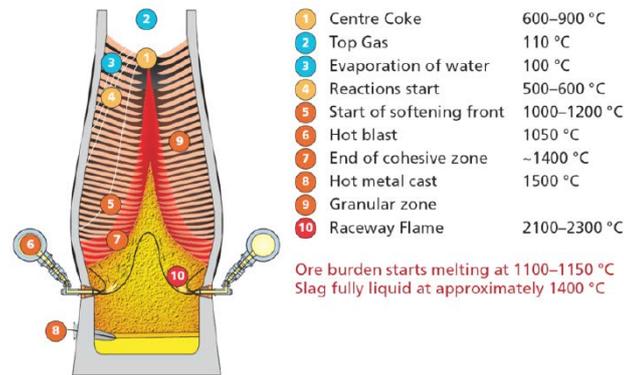


Figura 10 – Temperatura típica de um Alto Forno por regiões [4]

Quanto aos elementos estruturais de um Alto Forno, estes podem ser divididos em duas categorias distintas devido as técnicas de suporte empregadas, os Fornos Free-Standing (Auto Portantes) e os de Lintel (com anel de Suporte).

Este trabalho avaliou um Alto Forno Auto Portante com 20 anéis, 125 chapas concêntricas (40 à 120mm) com peso de 970 ton e um conjunto de Tubulações de limpeza de gás também Auto Portante, com 133 chapas (16 à 37,5mm) com 840 ton (com refratário incluído), conforme figura 11.

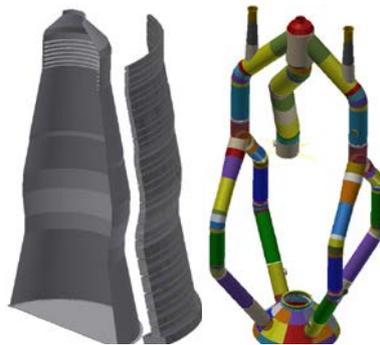


Figura 11 – Detalhe das estruturas analisadas

Para proteção contra abrasão (o gás de Alto Forno detém bastante partículas) e também para proteção térmica, as tubulações da Limpeza de gás são revestidas com uma camada de refratário de Alta Aluminas >86% em espessuras de 75 à 200mm.

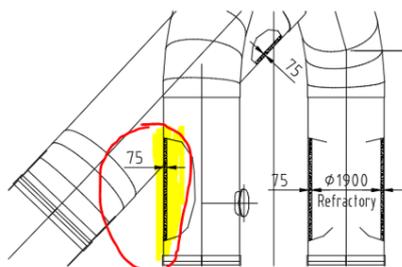


Figura 12 – Detalhe das regiões com refratário interno

Devido a natureza de um Alto Forno que é um reator com pressão interna constante, o método construtivo destes elementos é feito como a analogia de um vaso de pressão. Portanto para a confecção do cálculo construtivo de cada chaparia empregada, utilizou-se (e é internacionalmente usado para tal) os preceitos das normas da ASME (The American Society of Mechanical Engineers) como diretriz técnica normativa.

Para este estudo foi usado os critérios do volume 2 (Divisão 2, para a ASME) da norma VIII, Alternative Rules for Construction of Pressure Vessels [6] aonde já se pode utilizar análise de tensões para confecção de estudos. Não foi usado o volume 1, [5], pois como os elementos estruturais de um Alto Forno não são totalmente padronizados (há elementos com geometrias bastante complexas), os preceitos do volume 1 mostram-se pouco aplicáveis.

Inerente ao materiais as curvas e tensões respectivas para as temperaturas empregadas, todas estas informações foram retiradas do trabalho da própria ASME intitulado ASME BPVC Section II - Part D Metric de 2015 [7].

Foi analisado como cenários críticos um evento de sobreaquecimento ocorrido em 2017, na região do Top Cone (3 últimos anéis do Alto Forno) que também é a estrutura de suporte das tubulações da Limpeza de gás, como ilustrado na figura 13, aonde foram encontradas chapas com temperaturas aparentes de mais de 400°C.

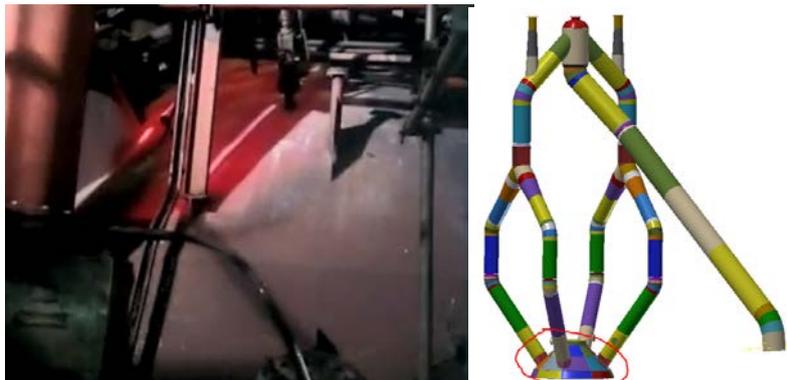


Figura 13 – Cenário de sobre-aquecimento da região do Top Cone

Foi encontrado também evidências de gradientes termicos discrepantes nas chaparias da Tubulação de Limpeza de Gás. Tal situação corrobora um crescente mecanismo de degradação física (perda de massa) da superfície do refratário empregado nestes pontos.

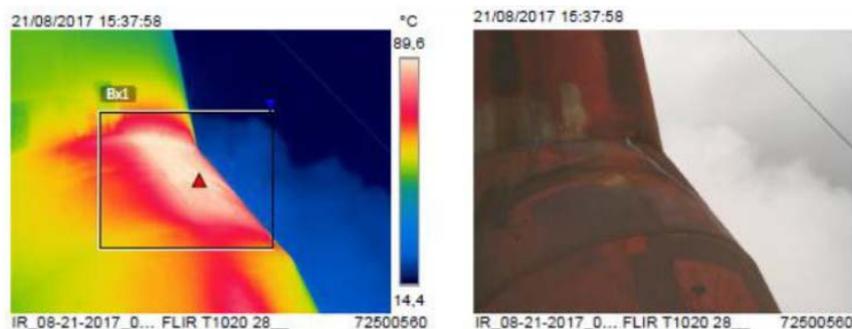


Figura 14 – Gradiente de Temperatura, perda de refratário nas curvas

Como o material empregado na chaparia do Alto Forno e das tubulações da Limpeza de Gás é o 16MnR, (aço da norma chinesa GB 6656), é um material comumente usado para construção de vaso de pressão, como também o americano ASTM A 516 gr70 (mais utilizado em projetos brasileiros de estruturas similares), foi feito também um comparativo das propriedade mecânicas destes dois materiais com o P355GH (bastante utilizado na Europa). Foram plotados, como expresso na figura 15, o comportamento de degradação das tensões de escoamento em cenário de sobrequecimento deste 3 materiais.

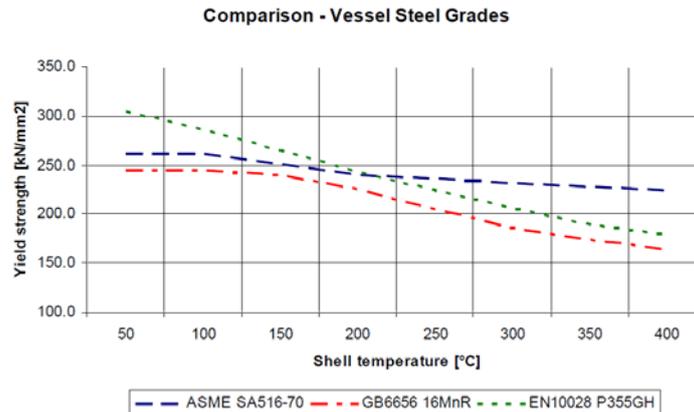


Figura 15 – Comparativos entre os principais aços para vaso de Pressão

Encontra-se representado pela figura 16, as tensões máximas admissíveis para confecção de projetos com o aço ASTM A 516 gr70 e a respectiva zona de início da Fluência neste material.

ASME BPV.C.H.D.M-2015

Table 5A (Cont'd)
Section VIII, Division 2
Maximum Allowable Stress Values S for Ferrous Materials

Maximum Allowable Stress, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding

Line No.	Temperature (°C)																	
	40	65	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475
1	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
2	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
3	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	113	95.1	79.5	62.6	45.0
4	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
5	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
6	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
7	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
8	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
9	175	164	159	157	154	152	150	147	144	140	136	132	128	122	101	83.8	66.8	50.3
10	175	164	159	157	154	152	150	147	144	140	136	132	128	122	101	83.8	66.8	50.3
11	184	173	168	165	163	160	158	155	151	148	144	139	138	136	101	83.8	66.8	50.3
12	184	173	168	165	163	160	158	155	151	148	144	139	138	136	101	83.8	66.8	50.3
13	184	173	168	165	163	160	158	155	151	148	144	139	138	136	101	83.8	66.8	50.3
14	184	173	168	165	163	160	158	155	151	148	144	139	138	136	101	83.8	66.8	—
15	184	175	168	164	160	157	153	151	148	146	143	141	138	136	—	—	—	—
16	198	186	180	177	175	172	169	166	163	159	154	150	145	142	—	—	—	—

Figura 16 – Diminuição da Tensão com temperatura do aço ASTM A 516 gr 70 [7]

Este trabalho buscou, por meio da equação 2, que prima por definir os critérios de aceite para tensões nas membranas, conforme [6], encontrar as tensões admissíveis em todas as tubulações da estrutura em diversos cenários de sobreaquecimento.

$$P_m \leq 0,95S_y$$

$$P_m + P_b \leq 1,43S_y \quad (2)$$

Onde.:

P_m é a tensão primária geral de membrana;

P_b é a tensão primária de flexão;

S_y é a tensão de escoamento do material.

As tensões admissíveis de membrana e membrana + flexão foram calculadas para os diferentes cenários de sobreaquecimento e encontram-se na figura 17.

TENSÕES ADMISSÍVEIS PELAS TEMPERATURAS				
Mpa	LOCAL		GLOBAL	
	MEMBRANA PRIMÁRIA	MEMBRANA + FLEXÃO	MEMBRANA PRIMÁRIA	MEMBRANA + FLEXÃO
120°C	248	373	372	746
240°C	205	309	308	618
350°C	166	250	249	501

Figura 17 – Tensões admissíveis para o aço Mn16R em relação aos cenários

Estas definições foram importantes para a confecção do comportamento da estrutura devido aos elementos inseridos. Os cenários de sobreaquecimento determinados foram obtidos pelas condições operacionais do Alto Forno, como 120°C sendo a temperatura de trabalho normal, 240°C a temperatura máxima que o fabricante original (Paul Wurth) determinou no projeto base e 350°C como temperatura máxima admissível, pois como foi expresso na figura 16, a região de início de fluência (sendo portanto, o início da deformação espontânea com o aumento da temperatura) é entorno de 400°C, mas para o aço ASTM A 516 gr 70. Não há, pelos trabalhos da ASME [7] ou mesmo na própria norma construtiva chinesa GB 6656, de curvas ou ábacos que determinem o início da fluência no aço Mn16R. Portanto a escolha da temperatura de 350°C foi determinada unicamente pelo início de grande perda de resistência deste aço após os efeitos de degradação térmica, como consta apresentado na figura 15.

A confecção dos modelos de membranas e caracterização das tensões encontradas de acordo com os modos de carregamento, foram feitos pela empresa Portuguesa ISQ, em sua unidade de Belo Horizonte – MG.

As análises se deram nesta empresa devido principalmente, ao know-how técnico em análise de Tensões que detêm, e também porque houve a necessidade de utilização de um grande poder computacional, pois as análises foram feitas em escala real com todas as membranas interligadas.

Foram escolhidos modos de carregamento de maneira que a estrutura se comportasse como a estrutura instalada e fosse possível avaliar diversos comportamentos distintos em cada elemento, conforme figura 18.

MODOS DE CARREGAMENTO	
1	1.35*DL
2	1.35*DL +1.35*LL2
3	1.35*DL +1.35*LL2 +1.35*P
4	1.35*DL +1.35*LL2 +1.35*P+ 1.0* TN
5	1.35*DL+1.35*LL2 +1.35*P+ 1.0*TN + 1.5 * Wx
6	1.35*DL+1.35*LL2 +1.35*P+ 1.0*TN - 1.5 * Wx

Figura 18 – Modos de carregamento da estrutura

Os modelos de membranas foram divididos em Top/ Bottom e Middle, como ilustrado pelas figuras 19 e 20

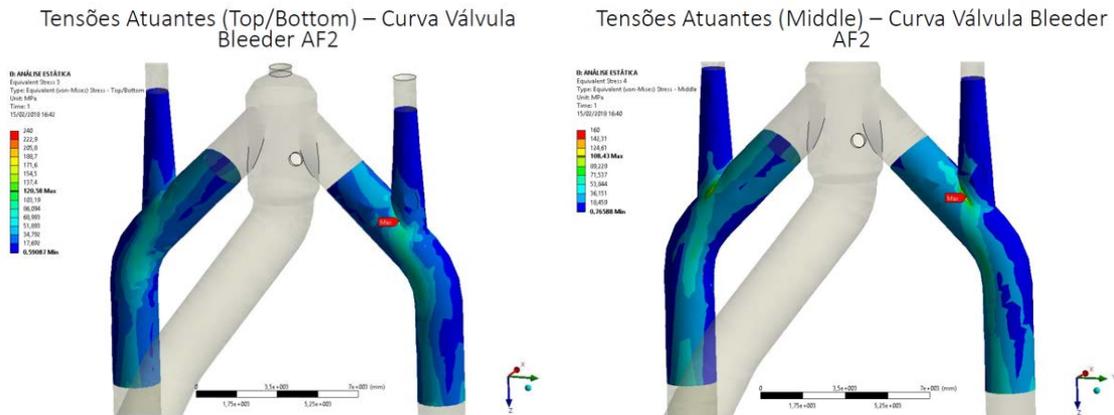


Figura 19 – Tensões de membrana encontradas em uma das regiões do AF

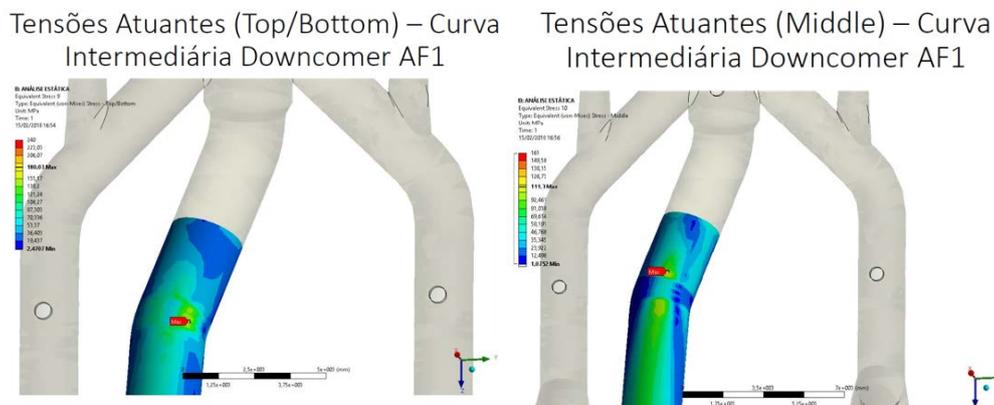


Figura 20 - Tensões de membrana encontradas em uma das regiões do AF

2.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em todos os cenários estudados, o comportamento mecânico desta estrutura mostra-se correto e adequado para as vicissitudes que um Alto Forno Siderúrgico de alta performance demanda. Contudo foi corroborado neste trabalho que em cenários de altíssima temperatura, $>300^{\circ}\text{C}$, o comportamento do aço Mn16R decresce tremendamente, podendo então, gerar efeitos adversos como distorções locais, deformações e até colapsos completos em eventos de imposição severa.

Como de projeto foram instalados refratários em toda a extensão das tubulações, a temperatura da chaparia é poupada desta carga térmica instantânea, mesmo quando há uma a imposição sustentada (de algumas poucas horas) de sobreaquecimento.

Entretanto, como um dos pontos mais frágeis de projetos de estruturas auto portante é a rigidez que suas ligações trazem para os elementos de ligação, pode-se perceber na figura 21, que as curvas são as regiões com maior degradação de refratário em toda a instalação.



Figura 21 – Degradação dos refratários nas curvas da instalação

Este comportamento de degradação sistemática das curvas gera um aquecimento localizado muito mais rápido do que no restante das estruturas. Portanto há então o risco de falhas estruturais nestes pontos. A figura 22 demonstra o atingimento significativamente alto de temperaturas elevadas após a perda de refratário.

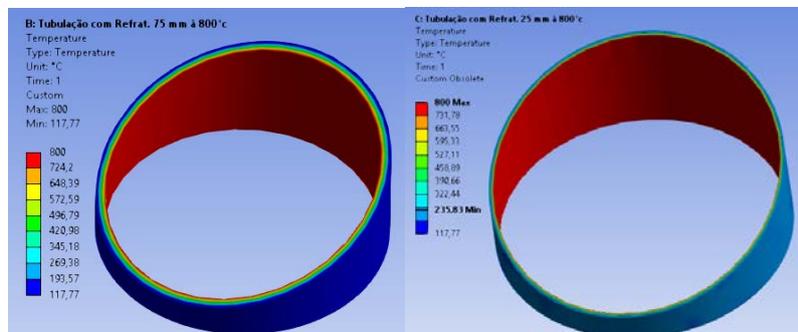


Figura 22 – Mudança de temperatura da chapa após a perda de 50 mm de refratário

Durante o período na qual foi confeccionado este estudo, foram consultados diversas empresas e plantas produtivas, aonde buscou-se melhores práticas para um cenário de restabelecimento da região com novo refratário.

De posse disto, este trabalho objetivou-se por confeccionar soluções que empregadas de maneira pontual ou até global, poderão mitigar/ solucionar os efeitos desta perda de refratário nas curvas. As devidas soluções encontram-se representadas nas figuras 23, 24,25 e 26.

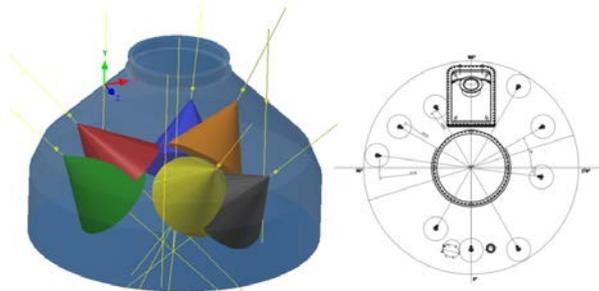


Figura 23 – Amostra da avaliação da efetividade dos sprays de água do Top Cone

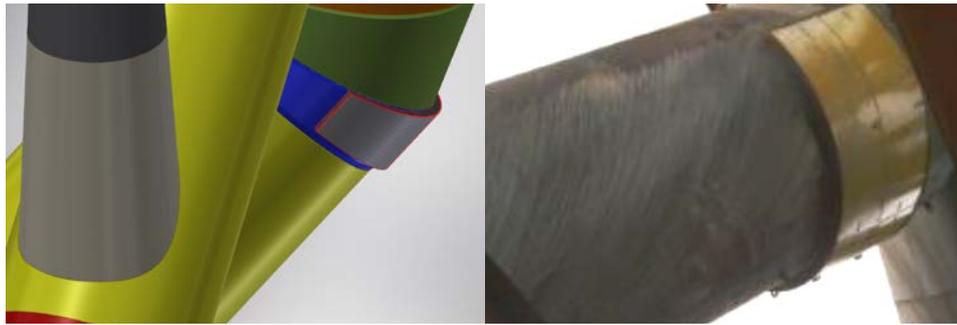


Figura 24 – Restabelecimento local de refratário de maneira externa

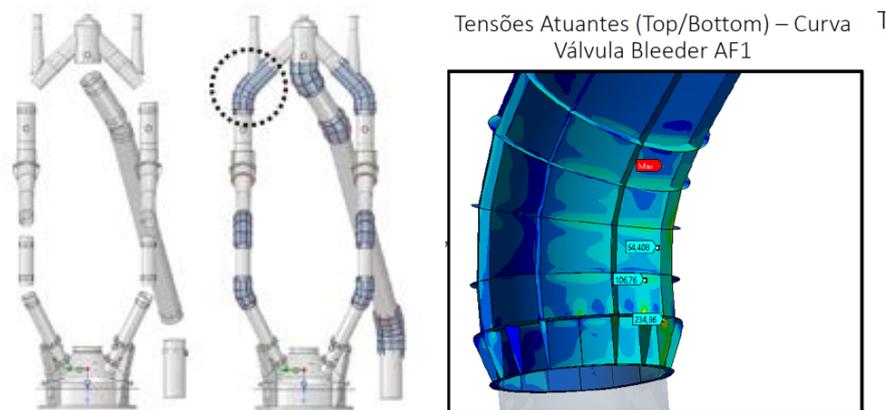


Figura 25 – Proposta de enrijecimento das curvas com capa externa metálica com refratário

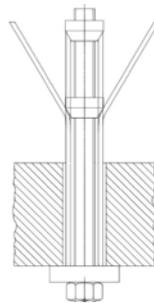


Figura 26 – Detalhe das âncoras de fixação do Refratário de fora para dentro

3 CONCLUSÃO

Após a confecção dos estudos de engenharia para cada elemento instalado da tubulação de Limpeza de Gás do topo do Alto Forno da unidade Rio de Janeiro da Ternium Brasil em diversos cenários de sobreaquecimento é possível concluir que.:

- O comportamento do aço Mn16R decai severamente com a imposição de sobreaquecimentos mantidos com temperaturas superficiais maiores do que 300°C por algumas horas. Esta perda pode causar danos superficiais (distorções, deformações) ou mesmo colapso estrutural em certas regiões da instalação e comprometer todo o processo produtivo e/ou gerar riscos para os colaboradores da planta.

- O refratário interno destas tubulações é a mais importante proteção para que este elemento não atinja rapidamente as temperaturas acima de 300°C e exerce uma medida de controle adicional para mitigar desequilíbrios térmicos no processo produtivo do Alto Forno.
- O comportamento de degradação do refratário das curvas da instalação é um risco potencial que deverá ser combatido, pois inviabiliza toda a estrutura a resistir por algumas poucas horas os efeitos do sobreaquecimento.
- Um refratário de alta alumina demanda uma remoção quase mecânica da região deteriorada e uma curva de “cura” de entorno de 7 dias. Esta solução mostrou-se não ser aplicável e/ou efetiva. Pois além deste tempo de cura, deverão ser majorados os dias para cortes na estrutura, demolição e instalação do refratário, o que é economicamente inviável.
- As propostas apresentadas foram feitas com o intuito de corrigir/ mitigar os efeitos da degradação das curvas e assegurar uma estrutura mais robusta para suportar eventos de sobreaquecimento, em condições que não demandem uma parada muito grande da produção do Alto Forno.

Mostra-se necessário para futuros trabalhos.:

- Efetuar teste empírico com o aço Mn16R de modo a achar a região de início do mecanismo de Fluência;
- Incrementar modelos de mecânica da fratura nas uniões soldadas;
- Incrementar o projeto de Spray na região do Top Cone;
- Pesquisa de métodos para diminuir o efeito de exaustão local de gases em cenários de reparo em paradas preventivas de pequena duração.

Agradecimentos

À operação do Alto Forno pela oportunidade de confeccionar este trabalho, aos colaboradores da A.P.I e a todos os demais dos departamentos de manutenção e operação dos Alto Fornos da TerniumBrasil de sua unidade Rio de Janeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Broek, D. The Practical Use of Fracture Mechanics. 2ª edição. Boston. Kluwer. 1998
- 2 Shackelford, J. F. Ciência dos Materiais. 6ª edição. São Paulo. Pearson Prentice. 2008
- 3 Panonni, F. Princ. Proteção Estruturas Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio. 6ª edição. Belo Horizonte. Gerdau. 2015
- 4 GEERDES, M.; et al. Modern Blast Furnace Ironmaking, 3ª ed., IOS Press. 2015
- 5 ASME SECTION VIII D1. Rules for Construction of Pressure Vessels. Edição 2017. Nova York. ASME. 2017
- 6 ASME SECTION VIII D2. Rules for Construction of Pressure Vessels. Edição 2017. Nova York. ASME. 2017
- 7 ASME BPVC Section II - Part D Material. Boiler and Pressure Vessel Code, Edição 2015. Nova York. ASME. 2017