

# GANHOS DE QUALIDADE E PRODUTIVIDADE COM O ALINHAMENTO TRIDIMENSIONAL DE MÁQUINAS DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO\*

Afrânio Marcio Costa <sup>1</sup>  
Daniel Magno Pereira<sup>2</sup>  
Harlei Pereira Rezende<sup>3</sup>  
Manoel de Oliveira<sup>4</sup>  
Paulo Rogério Vieira<sup>5</sup>  
Pedro Henrique Homem Ribeiro<sup>6</sup>  
Wenderson Tcharles Resende<sup>7</sup>

## Resumo

Esse trabalho busca apresentar uma nova metodologia de alinhamento de máquinas de lingotamento contínuo, através do uso de equipamentos de medição tridimensional portátil de longo alcance a Laser (Laser Tracker). Nele, será apresentado um estudo de caso prático, onde foi alinhado um veio de uma máquina de lingotamento contínuo de placas, permitindo assim fazer uma comparação direta dos ganhos de qualidade e produtividade antes e depois do alinhamento tridimensional.

**Palavras-chave:** Máquina de lingotamento contínuo de placas; Alinhamento tridimensional; Laser Tracker; Ganhos de qualidade e produtividade.

## QUALITY AND PRODUCTIVITY PERFORMANCE IMPROVEMENT OF CONTINUOUS SLAB CASTING MACHINE THROUGH THE TRIDIMENSIONAL ALIGNMENT PROCESS

### Abstract

This work aims to present a new methodology for the alignment of continuous casting machines through the use of portable long-range laser measuring equipment (Laser Tracker). In this paper will be presented a practical case study, where one of the machine veins of the continuous casting machine was aligned, thus allowing a direct comparison of the quality and productivity gains before and after the alignment.

**Keywords:** Continuous Casting Machine; Tridimensional Alignment; Laser Tracker; Quality and productivity improvement.

<sup>1</sup> Mestre Engenharia Metalúrgica, Gerente Técnico de Pesquisa e Desenvolvimento de Aços Planos, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Técnico Mecânico, Líder Metrologista, Tecnimex Group, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Especialista de Manutenção de Lingotamento Contínuo, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, Coordenador de Manutenção do Lingotamento de Placas, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>5</sup> MBA em Gestão Empresarial, Pós-graduado em Gestão Tributária, Pós-graduado em Administração de Empresas, Tecnólogo em Projeto de Máquinas, Diretor Técnico do Grupo Tecnimex, São José dos Campos, SP, Brasil.

<sup>6</sup> Técnico Mecânico, Diretor Regional Tecnimex Group, Serra, ES, Brasil.

<sup>7</sup> Engenheiro Metalurgista, Coordenador da Oficina de Moldes e Segmentos dos Lingotamentos Contínuos, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

De maneira inversa à eletrônica que encontra limites na miniaturização de seus componentes, a mecânica encontra seu limite no tamanho cada vez maior das peças e equipamentos, principalmente quando aliado às tolerâncias dimensionais cada vez mais estreitas. Além disso, o aumento da competitividade, os curtos prazos de entrega e a crescente exigência por qualidade, se tornaram grandes desafios produtivos para a indústria de grande porte de um modo geral.

Para empresas de todo o mundo, especialmente aquelas dos segmentos tecnológicos de ponta como o aeroespacial e automotivo, superar esses desafios foi um fator crucial. Muitas delas encontraram a solução na utilização de avançadas máquinas de medição tridimensional portáteis de longo alcance chamadas Laser Tracker, que aliadas à modernos sistemas de CAD (Figura 1.1), possibilitam a construção e a inspeção de seus produtos de forma extremamente rápida, precisa e flexível, independentemente do tamanho do objeto e do local onde o mesmo se encontra.

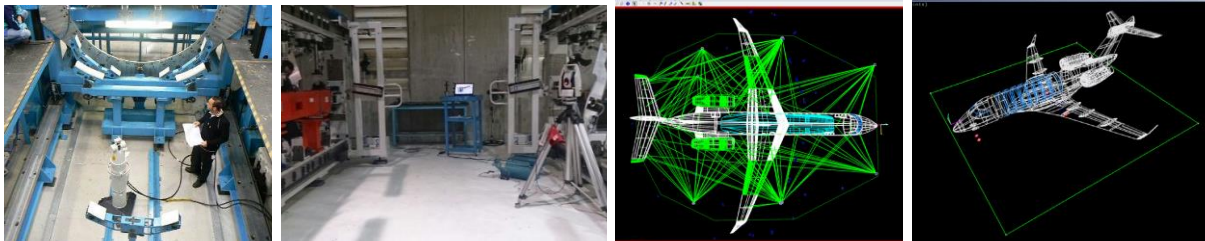


Fig. 1.1 - Controle dimensional com Laser Tracker na indústria aeronáutica (Fonte: Acervo do autor)

A utilização dessa tecnologia trouxe ganhos de qualidade e de produtividade nunca vistos, pois componentes de alta complexidade, com grandes dimensões e tolerâncias apertadas, puderam ser fabricados em curto espaço de tempo e com alto grau de confiabilidade, uma vez que o controle dimensional é feito durante o processo produtivo.

No Brasil, o primeiro Laser Tracker chegou em 1998 para ser aplicado na indústria aeronáutica e sua introdução na siderurgia ocorreu em 2007 na medição de uma cadeira de laminação. O uso do Laser Tracker na siderurgia se consolidou em 2009, na medição de uma máquina de lingotamento contínuo de placas (Figura 1.2), expandindo em seguida para outras aplicações em todo o processo produtivo do aço.

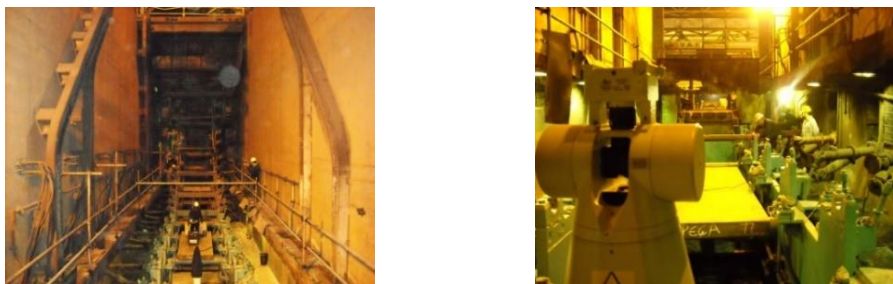


Fig. 1.2 – Alinhamento de máquina de lingotamento contínuo de placas (Fonte: Acervo do autor)

Dito isso, esse trabalho visa exemplificar de uma forma simples e clara o processo de alinhamento de uma máquina de lingotamento contínuo de placas através do uso do Laser Tracker, demonstrando sua metodologia e ganhos. Para isso, os resultados

obtidos por comparação entre o veio antes e após o alinhamento serão apresentados.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Laser Tracker - Origem, princípio de funcionamento e características

O Rastreador interferométrico tridimensional, Laser Tracker, teve sua tecnologia básica desenvolvida por um pequeno grupo na NBS (“National Bureau of Standards”) nos EUA, sendo patenteado em 1987. Os futuros desenvolvimentos dessa tecnologia foram continuados por uma pequena empresa denominada API (“Automated Precision Inc”), que em 1988 passou a procurar por uma empresa para uma parceria comercial e produtiva. Em 1989 a Kern & Co.Ltda, posteriormente Leica Geosystems e agora Hexagon Metrology, adquiriu essa tecnologia, lançando em 1990 na Quality Show em Chicago um “Laser Tracker” totalmente redesenhado (Figura 2.1) [Ref. 1 - Leica product information, Smart 10].

De um modo geral pode-se descrever o Laser Tracker como sendo uma máquina de medição tridimensional portátil que utiliza um laser interferométrico para medição de distância, dois encoders (vertical e horizontal) de alta precisão para medição angular, combinado a um mecanismo direcionador e um sensor de posição (PSD) de alta resolução, permitindo assim rastrear um refletor manual e medir seu posicionamento tridimensional no espaço enquanto este é movimentado. Além do laser interferométrico, pode ser adicionado um laser para medição de distância absoluta [GREENWOOD, 1993]. O Laser Tracker executa suas medições em coordenadas polares (Figura 2.1), ou seja, ângulo vertical, ângulo horizontal e distância do centro de giro do cabeçote até o centro do refletor, medindo até aproximadamente 1000 pontos por segundo. Um computador converte essa medição em coordenadas retangulares, comumente utilizada no campo [Ref. U1-294-OEN-VIII.97].

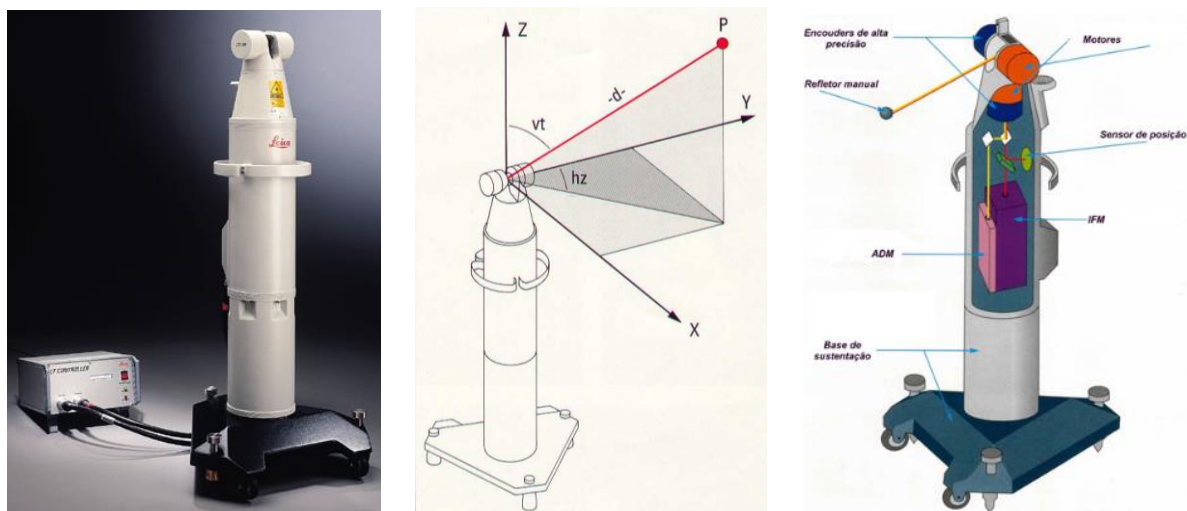


Fig. 2.1 – Princípio do Laser Tracker (Fonte: Catálogo Leica Smart 310 - 3D Laser Tracker - p. 6 - Ref. U1-206e – V.93 e Catálogo Leica Laser Tracker - Portable Coordinate Measuring Machine for small and large objects – Ref. 713895en – XI.99)

### Características técnicas do Laser Tracker (Modelo de referência LTD-500 Leica):

#### Laser Interferométrico (IFM):

- |                              |                              |
|------------------------------|------------------------------|
| - Princípio de funcionamento | interferômetro de raio único |
| - Produto a laser classe 2   | <0.3 mW/CW                   |
| - Comprimento de onda        | 633 nm (visível)             |

#### Máxima velocidade de rastreamento:

- |                       |           |
|-----------------------|-----------|
| - Angular             | > 4.0 m/s |
| - Na direção do laser | > 6 m/s   |

#### Aceleração máxima:

- |                        |       |
|------------------------|-------|
| - Em todas as direções | > 2 g |
|------------------------|-------|

#### Campo de medição:

- |              |          |
|--------------|----------|
| - Horizontal | ± 235°   |
| - Vertical   | ± 45°    |
| - Distância  | 0 - 40 m |

#### Precisão:

- |                                    |                      |
|------------------------------------|----------------------|
| - Resolução angular                | 0.14"                |
| - Resolução linear (distância)     | 1.26µm               |
| - Repetitividade de uma coordenada | ± 5 ppm (µm/m)       |
| - Precisão absoluta de uma coord.: |                      |
| .alvo estático                     | ± 10 ppm (µm/m)      |
| .alvo dinâmico                     | ± 20 - 40 ppm (µm/m) |

Capacidade máxima de medição 1000 pontos/seg.

#### Laser para medição de distância absoluta (ADM):

- |                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| - Princípio de funcionamento | luz polarizada modulada |
| - Produto a laser classe 1   | <0.5 mW/2sec.           |
| - Comprimento de onda        | 780 nm (infravermelho)  |
| - Diâmetro do laser          | ca. 10 mm               |
| - Resolução                  | 1 µm                    |
| - Precisão                   | ± 0.025 mm              |
| - Alcance                    | 1.5 - 40 m              |

#### Condições ambientais:

- |                                  |                             |
|----------------------------------|-----------------------------|
| - Temperatura de trabalho        | +5 à +40 °C                 |
| - Temperatura de armazenagem     | -10 à +60 °C                |
| - Umidade relativa               | 10 à 90 % (sem condensação) |
| - Pressão atmosférica / elevação |                             |
| .operação                        | 0 à 3000 m                  |
| .armazenagem                     | 0 à 7000 m                  |

Fonte: Catálogo Leica Tracker - Portable Coordinate Measuring Machine for small and large objects – Ref. 713895en – XI.99

## 2.2 - Conceito geral de uma máquina de lingotamento contínuo

As máquinas atuais são divididas em vários segmentos que são posicionadas em uma estrutura mecânica conhecida popularmente como viga “*banana*”. Tal viga é fixada na estrutura civil, fundação que sustenta toda a carga aplicada à máquina. Garantir que os segmentos estejam perfeitamente alinhados e, conseqüentemente, permitir que a placa, bloco ou tarugo passe suavemente pelos rolos é o maior desafio durante a montagem e vida do lingotamento. A figura 2.2 mostra uma imagem de uma viga banana típica de máquinas modernas de lingotamento de placas.



Fig. 2.2 – Desenho da viga banana da máquina de lingotamento de placas (Fonte: acervo do autor).

O lingotamento contínuo de placas de Ouro Branco é composto por uma máquina de dois veios, comprimento metalúrgico de 40 metros, raio de 9 metros e formada por 16 segmentos em cada veio. O molde possui 900mm, segmento 0, ou bender, com 3,9 metros de parte vertical, segmentos de 1 a 6 são curvos (bow), dois segmentos descurvadores (straingtener) e mais 7 segmentos horizontais.

Uma máquina de lingotamento contínuo em perfeitas condições de manutenção é fundamental para garantia da qualidade dos produtos nela produzidos. Os especialistas neste assunto costumam dizer que dois fatores são determinantes para isso, boa qualidade da água e excelente alinhamento e gap entre os rolos.

## 2.3 – Descrição do processo de alinhamento com o Laser Tracker

Sendo uma das máquinas mais precisas e complexas em termos de precisão e alinhamento na siderurgia, a máquina de lingotamento contínuo de placas é um exemplo de aplicação ideal para o Laser Tracker. Suas baixas tolerâncias de construção e montagem, e seus componentes (Pads) que necessitam ser alinhados em posições complexas (inclinadas) de acordo com o raio da máquina, são excelentes desafios tanto para o Tracker quanto para o metrologista. Contudo, seja na instalação de novas máquinas, em revamps ou em manutenções periódicas, algumas premissas devem ser respeitadas, como segue:

- Nenhuma intervenção, mesmo que localizada, pode ser feita sem um entendimento do alinhamento geral da máquina;

- Marcos feitos com metologia de medição menos precisa devem obrigatoriamente ser verificados, garantindo assim sua confiabilidade, em especial marcos antigos;
- Antes de executar os ajustes na máquina, deve ser feita uma detalhada análise técnica dos resultados obtidos nas medições . Utilizando as avançadas análises do software do Laser para simular as diferentes possibilidades, afim de reduzir a quantidade e a intensidade das intervenções;
- Durante o processo de ajuste, a relação entre componentes como a torre, distribuidor, o molde e a viga banana, devem ser rigorosamente respeitadas, analisando sempre o conjunto e a transição de cada componente, em especial dos segmentos da viga banana e seus pads;
- Além de um alinhamento preciso dos componentes fixos da máquina como a torre e a viga banana, os componentes móveis como segmentos e molde, devem ter sua tolerância de montagem rigorosamente respeitados, caso contrário de nada adiantará um alinhamento preciso da parte fixa;
- Para um bom alinhamento dos segmentos, é necessário também um preciso alinhamento dos stands de calibração e um preciso controle das régua de inspeção. Um segmento pode ser montado com a utilização do Laser Tracker, sendo um processo ainda mais rápido e preciso.

A seguir serão descritos os passos para alinhamento da máquina com o Laser Tracker.

O processo de alinhamento de uma máquina se inicia muito antes da intervenção em campo, através da análise dos desenhos e geração dos modelos virtuais CAD de referência. (Figura 2.3)

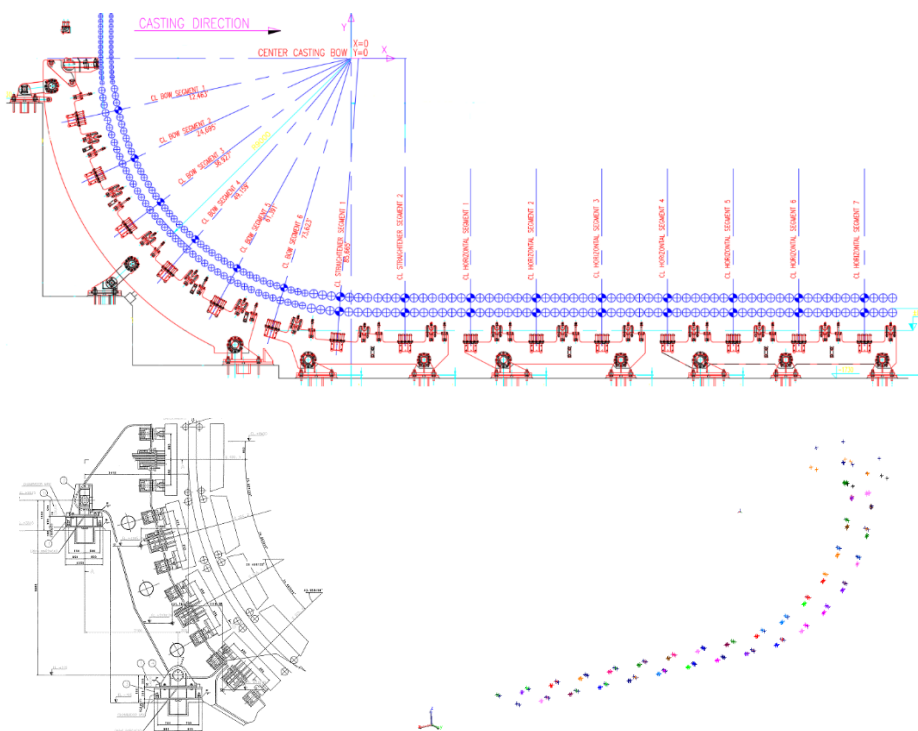


Fig. 2.3 – Desenhos da máquina de lingotamento e modelo 3D gerado (Fonte: acervo do autor)

Após uma criteriosa análise dos desenhos e elaboração do modelo tridimensional, já com os segmentos desmontados e a máquina preparada para a intervenção, são inspecionados todos os marcos topográficos de referência (Figura 2.4) para confrontamento e revalidação. Também são medidos os outros componentes como a torre, para posterior análise em relação a posição da viga banana.

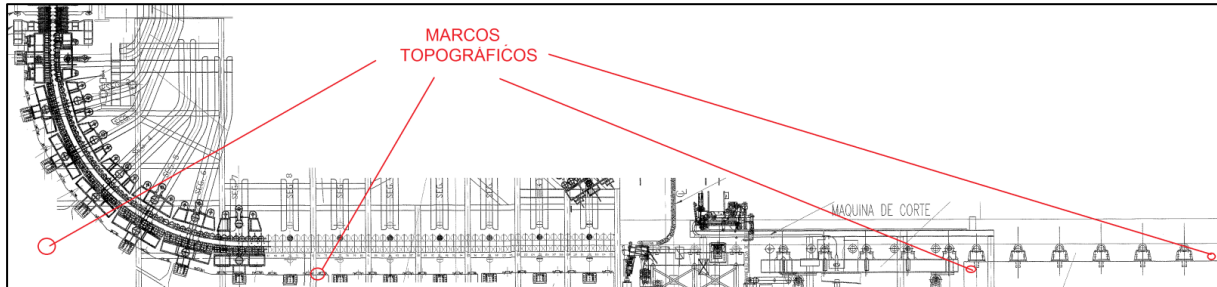


Fig. 2.4 – Posicionamento dos marcos topográficos de partida (Fonte: acervo do autor)

Após serem verificados os marcos, o laser é montado na parte reta da máquina e ao final da parte curva, permitindo medir todos os pads da parte reta e da parte curva da viga banana, se possível de uma única posição. Quando não é possível, posiciona-se o laser mais ao final da parte reta, para medir os pads faltantes (Figura 2.5).

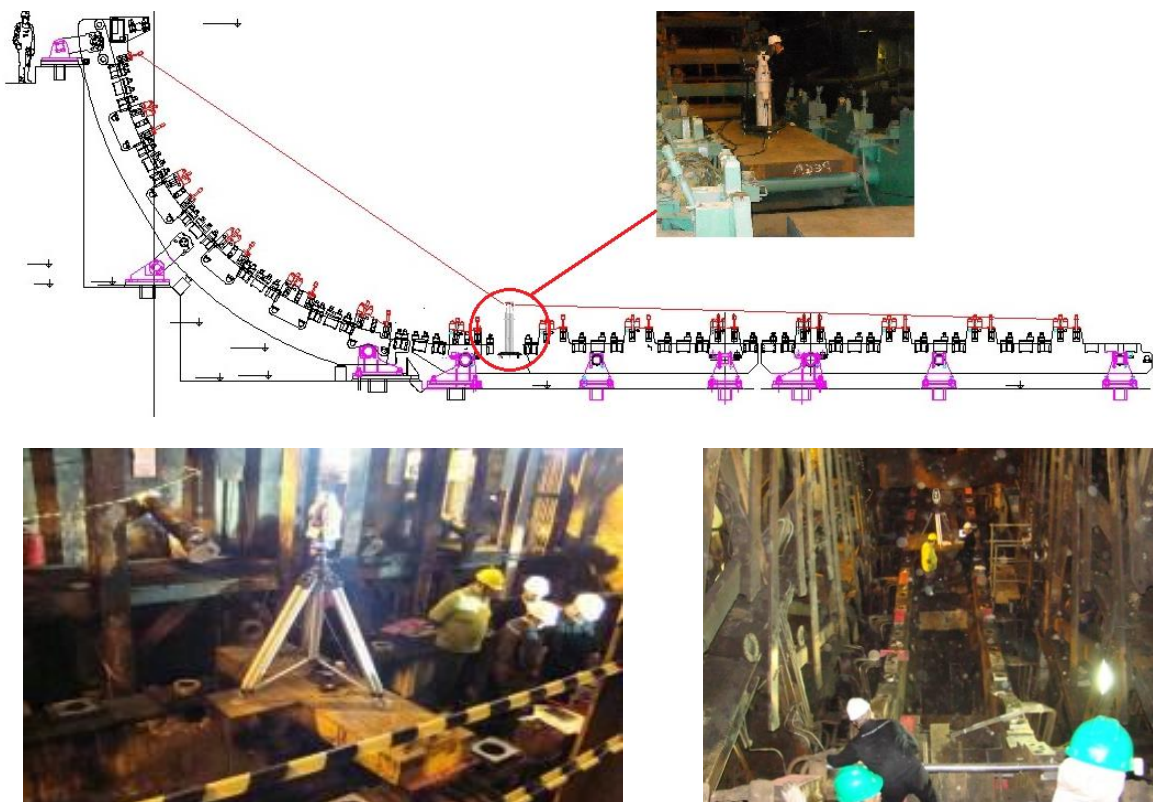


Fig. 2.5 – Posicionamento do Tracker na Viga Banana (Fonte: acervo do autor)

Uma vez que os pads da viga banana foram medidos, o laser é posicionado na parte superior da máquina para medição dos mancais, apoios e pinos do suporte do Bender (Figura 2.6).

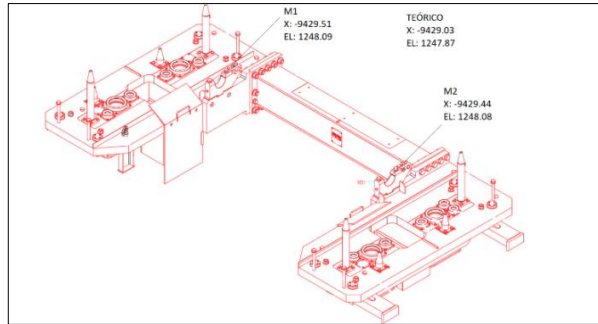
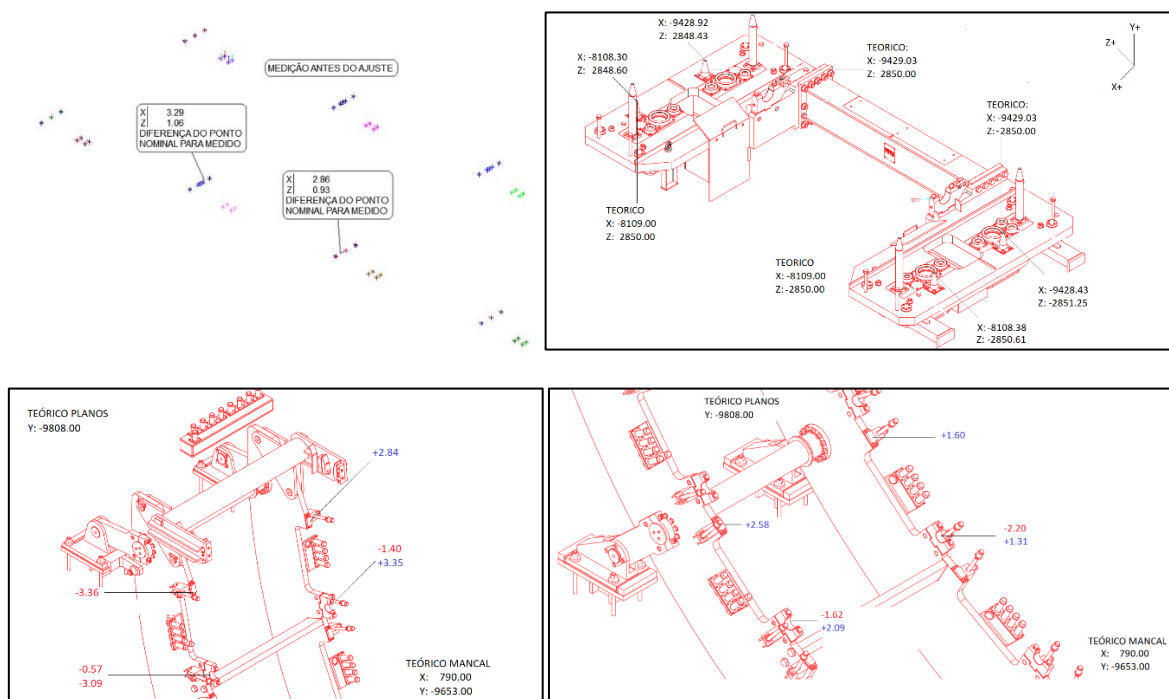


Fig. 2.6 – Posicionamento do tracker na parte superior da máquina (Fonte: acervo do autor)

Finalmente, com todos os componentes inspecionados é feita uma análise geral dos mesmos e suas inter-relações pelo software de medição 3D, que calcula por mínimos quadrados os desvios entre os pontos medidos e os seus respectivos nominais. Dessa forma, pode ser gerado um mapeamento com todos os desvios encontrados, permitindo a geração de um relatório completo e claro, que pode ser gráfico ou numérico, conforme exemplos abaixo (Figura 2.7). Isso resulta em uma visualização gráfica correta e confiável da situação real do veio. Pode-se realizar simulações no software visando avaliar o efeito de correções pontuais no alinhamento total do veio. Isso traz confiança para a realização dos ajustes necessários e, ao mesmo tempo, reduz o tempo com ajustes de posição mais vezes desnecessárias.

(a)





(b)

SEGM		Type of pad	Segment Angle	LEFT											
				X THEOR	Z THEOR	Y THEOR	X Deviation	Z Deviation	Y Deviation	X Deviation	Z Deviation	Y Deviation	Lateral Deviation	Height Deviation	
1	ENTRY	free	21,44	-82,628	6030,05	1000	-82,60	6030,03	997,20	0,03	-0,02	-2,80	0,03	0,02	
	EXIT	slide		521,26	7187,012	1000	-521,79	7188,34	999,21	-0,53	1,13	-0,79	1,43	0,00	
2	ENTRY	free	31,44	285,803	5289,15	1000	284,22	5291,86	996,98	-1,58	2,71	-3,02	3,14	0,06	
	EXIT	slide		311,71	4265,206	1000	311,74	4265,28	997,10	0,01	-0,05	-2,90	0,04	-0,02	
3	ENTRY	free	41,44	1403,22	3599,658	1000	1401,11	3602,11	997,93	-2,11	2,45	-2,07	3,23	0,04	
	EXIT	slide		2197,422	2700,079	1000	2197,40	2700,17	999,69	-0,02	0,09	-0,31	-0,08	0,04	
4	ENTRY	free	51,72	2889,209	2155,151	1000	2891,48	2153,41	998,98	2,22	-1,72	-1,02	-2,81	0,03	
	EXIT	slide		3831,2	3413,705	1000	3831,25	3413,78	1000,92	0,05	0,06	0,92	0,60	0,07	
5	ENTRY	free	62,26	4604,532	909,325	1000	4606,89	908,14	999,47	2,36	-1,19	-0,53	-2,64	0,05	
	EXIT	slide		5696,814	350,773	1000	5698,63	350,83	1001,35	0,02	0,06	1,55	-0,61	0,06	
6	ENTRY	free	72,81	6520,688	-2,385	1000	6521,04	-2,60	1000,46	0,85	-0,22	0,46	-0,88	0,05	
	EXIT	slide		7667,084	357,034	1000	7667,052	-357,054	1000,52	-0,03	-0,02	0,52	-0,02	-0,03	
7	ENTRY	free	82,64	8463,445	-527,742	1000	8465,39	-527,94	998,33	1,94	-0,20	-1,67	-1,96	0,05	
	EXIT	slide		9653,526	681,666	1000	9653,56	-681,43	998,71	0,00	0,04	-1,29	0,60	0,03	
8	ENTRY	free	89,2655	10290,187	-715,006	1000	10290,71	-714,96	999,05	0,52	0,05	-0,95	-0,56	0,06	
	EXIT	slide		11490,088	-730,389	1000	11490,08	-730,36	1000,32	-0,01	0,03	0,32	-0,04	0,03	
9	ENTRY	free	90	12189,393	-775	1000	12190,46	-774,92	1001,31	1,07	0,08	1,31	-1,07	0,08	
	EXIT	slide		13389,393	-775	1000	13391,24	-774,90	998,31	1,85	0,10	1,68	1,85	0,10	
10	ENTRY	free	90	14259,393	-775	1000	14259,63	-774,97	1000,39	0,24	0,03	0,39	-0,24	0,03	
	EXIT	slide		15459,393	-775	1000	15461,72	-774,96	999,20	2,33	0,04	-0,80	2,33	0,04	
11	ENTRY	free	90	17529,393	-775	1000	17531,99	-775,00	999,90	2,60	0,00	-0,10	-2,60	0,00	
	EXIT	slide		18399,393	-775	1000	18399,41	-774,98	998,91	0,02	0,02	-1,09	0,02	0,02	
12	ENTRY	free	90	20469,393	-775	1000	20471,14	-774,93	998,65	1,75	0,07	-1,35	-1,75	0,07	
	EXIT	slide		21669,393	-775	1000	21672,77	-775,00	998,09	3,38	0,00	-1,91	3,38	0,00	
13	ENTRY	free	90	22519,393	-775	1000	22540,29	-774,96	999,20	0,90	0,04	-0,80	-0,90	0,04	
	EXIT	slide		23389,393	-775	1000	23391,75	-774,98	998,74	2,34	0,12	-1,26	2,34	0,12	

Fig. 2.7 – Exemplos de relatórios gerados (a) correção via desenho e (b) tabela de ajustes necessário por posição. (Fonte: acervo do autor)

## 2.4- Ganhos de qualidade com alinhamento 3D

Depois de concluído o alinhamento de um dos veios foram retiradas amostras de placas e submetidas aos ensaios de macro ataque visando avaliar os impactos na qualidade interna. No caso de Ouro Branco o ensaio de macro ataque é realizado aplicando-se ácido clorídrico, 5% diluído em água à uma temperatura de 55°C por 15 minutos. Foram cortadas amostras de ambos os veios e realizadas comparações. Além disso comparou-se também os resultados do mesmo veio antes e após o trabalho de alinhamento, bem como análise estatística dos resultados de qualidade interna para diferentes aços.

Os resultados de macro para um aço médio carbono, mesma dimensão de placa, mesmo veio e condição de lingotamento antes e após o alinhamento são apresentados a seguir. Em Ouro Branco adota-se o padrão Mannesmann de classificação de qualidade interna de placas, onde o nível 1 é o melhor e o nível 4 o pior. Na figura 2.8 são apresentadas imagens da amostra no centro da placa, enquanto figura 2.9 do lado direito.

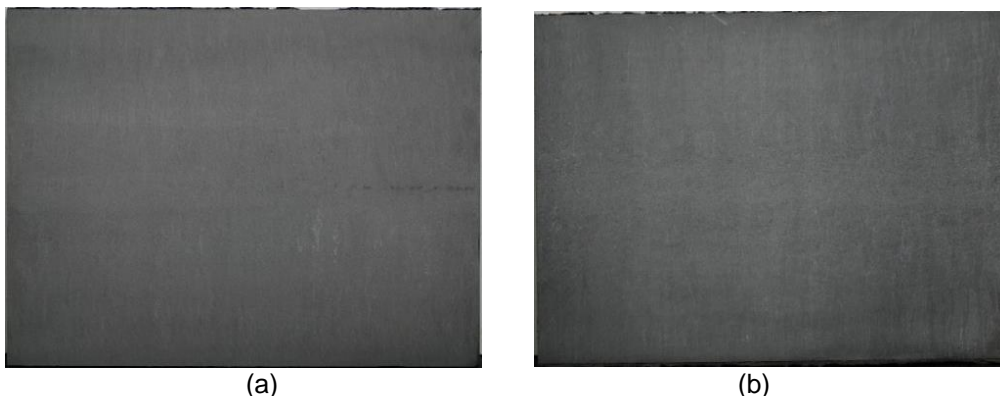


Figura 2.8 – Resultados de macro ataque do veio (a) antes do alinhamento e (b) após alinhamento para uma amostra transversal no **centro da placa**.

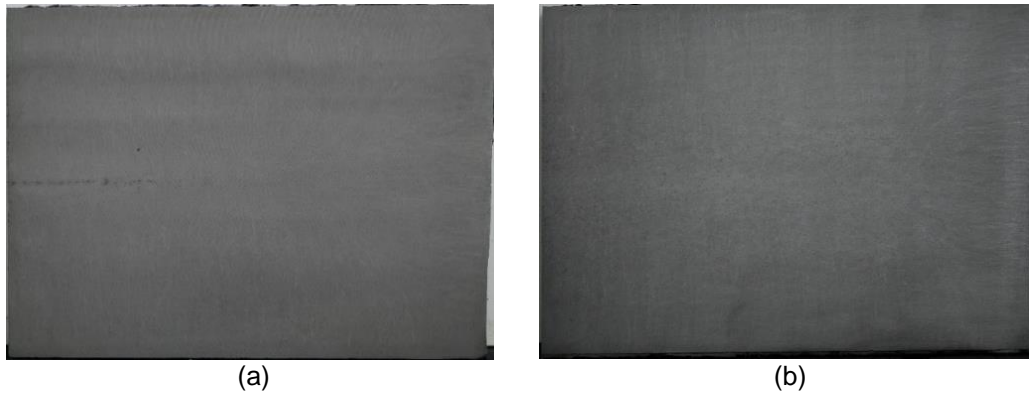


Figura 2.9 – Resultados de macro ataque do veio (a) antes do alinhamento e (b) após alinhamento para uma amostra transversal do **lado direito da placa**.

Em ambas as posições, centro e lado direito, os resultados observados após o alinhamento estão em um nível melhor de segregação.

Para efeito de comparação das condições de alinhamento da máquina antes e após o trabalho foram realizadas medições via “Roll Gap Checker”. Em geral o alinhamento do veio ficou aproximadamente 30% melhor quando consideramos as transições entre os segmentos, levando-se em consideração uma tolerância de  $\pm 1$ mm.

Comparando-se os resultados gerais de segregação do veio alinhado, constata-se uma evolução positiva de qualidade. A figura 2.10 mostra os resultados obtidos para todos os aços produzidos no veio alinhado no ano de 2018.

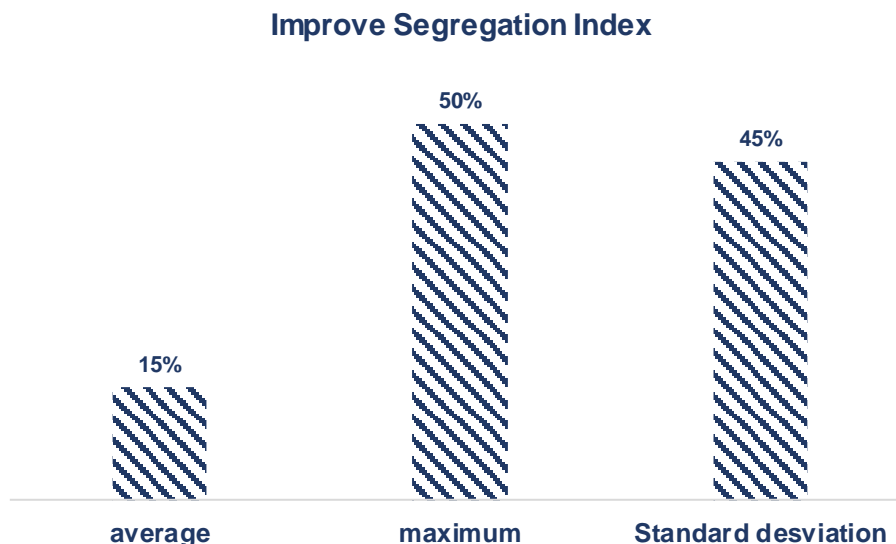


Figura 2.10 – Evolução dos resultados de segregação em aços peritéricos e médio carbono produzidos no veio que foi alinhado com o Lazer Tracker em 2018.

### 3 CONCLUSÃO

Sabe-se que muitas variáveis, além do correto alinhamento do veio, podem contribuir para os resultados de macro ataque em placas. No caso em questão, percebeu-se um nível de segregação menor a partir do momento que foi realizado o alinhamento do veio com o laser Tracker. O desvio padrão dos resultados de

segregação reduziu quase pela metade, 45%. Outro ponto interessante é que após o trabalho realizado não foram mais observados níveis de segregação similares aos anteriores. Vale ressaltar ainda que a metodologia de alinhamento com o Laser tracker, não só trouxe o resultado de ganho de qualidade esperado, mas também se mostrou uma eficiente ferramenta de alinhamento, pois permitiu fazer o trabalho de alinhamento num tempo menor do que previsto para a parada. Isso graças a sua capacidade de medir em tempo real, pois permite analisar os desvios enquanto o componente é ajustado. Essa tecnologia trouxe também mais segurança para os especialistas no momento da tomada de decisão com relação às posições na máquina que precisam ser corrigidas pois nos permitiu visualizar o efeito das modificações nas condições de transição e alinhamento dos segmentos e rolos antes da atuação na máquina.

## REFERÊNCIAS

- 1 Vieira, Paulo R. A utilização de máquinas opto-eletrônicas portáteis de longo alcance para medição tridimensional como fator de otimização fabril, São Bernardo do Campo: Centro Universitário da FEI, 1999.
- 2 Leica Product Information Smart 310, “Leica’s Approach to High-Precision Dynamic 3D Coordinate Determination”, 1991, 8p.
- 3 “3D-Laser Tracking Systems – The Hardware”, Ref. U1-294-OEN-VIII.97, 1997, 6p.
- 4 Catálogo Leica, “3D Laser Tracker”, Ref. U1 206e– V.93, 1993, 8p
- 5 Catálogo Leica, “Portable Coordinate Measuring Machine for small and large objects”, Ref. 713895en – XI.99, 1999, 12p.