

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DA ESTRUTURA DE FERRO DA PONTE SIMÓN BOLÍVAR, SÉCULO XIX, AREQUIPA, PERU

Elmer Mamani-Calcina*

Edgar Apaza-Huallpa*

Daysi Gonzales-Diaz*

Hector Vargas-Cardenas*

Dany Michell Andrade-Centeno*

Fernando José Gomes Landgraf**

Cesar Roberto de Farias Azevedo**

Resumo

O trabalho apresenta resultados de pesquisa sobre a microestrutura e a dureza de diversos setores da estrutura da ponte de ferro Simón Bolívar, situada em Arequipa (Peru), supostamente projetada por Gustavo Eiffel, e entregue ao público em 1882. A caracterização microestrutural dos componentes revelou tratar-se de ferro pudlado com matriz ferrítica de grãos equiaxiais e numerosas inclusões de escória e de componentes de ferro fundido. A análise química das amostras de ferro pudlado indicou teor de carbono de 0,056% e alto teor de fósforo (acima de 0,15%) e enxofre (entre 0,07 e 0,15%). Ensaios de dureza Rockwell B dos componentes de ferro pudlado apresentaram valor médio de 70,5HRB. A caracterização microestrutural dos componentes de ferro fundido cinzento revelou veios de grafita do tipo A em matriz ferrítico-perlítica, com presença de eutético de ferro e fosfeto de ferro (steadita). Os resultados apresentados produziram informações úteis sobre as propriedades mecânicas dos principais elementos estruturais da ponte, possibilitado o modelamento das tensões de serviço e a

* *Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Av. Venezuela s/n, Área Engenheiras, Arequipa, Perú; emamanical@unsa.edu.pe*

** *Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Professor Mello Moraes, 2463, São Paulo, Brasil.*

identificação das regiões críticas da ponte. A intensa presença de inclusões de escória nos componentes de ferro pudlado (~10% do volume) mostra os limites tecnológicos da técnica de refino de ferro da época nos Estados Unidos da América.

Palavras-chave: caracterização microestrutural; ferros pudlados; ferros fundidos cinzentos; patrimônio arqueológico férreo do Peru.

1. Introdução

A ponte Simón Bolívar, também conhecida como *El Puente de Fierro* (vide Figuras 1a e 1b), é um dos patrimônios culturais da cidade de Arequipa, Peru. A ponte sobre o Rio Chili possui comprimento de 488m e foi inaugurada em 1882, como parte do circuito ferroviário que ligava a área costeira à Arequipa, em direção à Puno, Cuzco e depois Tacna (vide Figuras 2a e 2b). Declarada monumento histórico do Peru¹, pelo decreto R.M. N° 1251-85-ED, publicado em 9 de março de 1986. A construção pertence a uma tipologia de ponte para ferrovias que utiliza treliças e tirantes diagonais, colunas Phoenix e treliças do tipo Fink (Pinto-Rodrigues, 2016). A coluna Phoenix, patenteada por Samuel Reeves em 1862, é um cilindro oco composto por quatro, seis ou oito segmentos de ferro forjado rebitados juntos. Esta coluna é mais leve e resistente do que as colunas de ferro fundido - cilindros cheios - usadas na época, permitindo a construção de pontes que suportam carregamentos mecânicos mais intensos. Todos os seus elementos estruturais da ponte foram produzidos pela *Phoenix Iron Company*, Filadélfia, EUA. Este projeto apresenta características típicas de leveza das pontes americanas do final do século XIX, mas muitos ainda creditam este projeto ao francês Gustav Eiffel (GUTIERREZ-PINTO, 2013; NEUMAN, 2014).

¹ Disponível em:

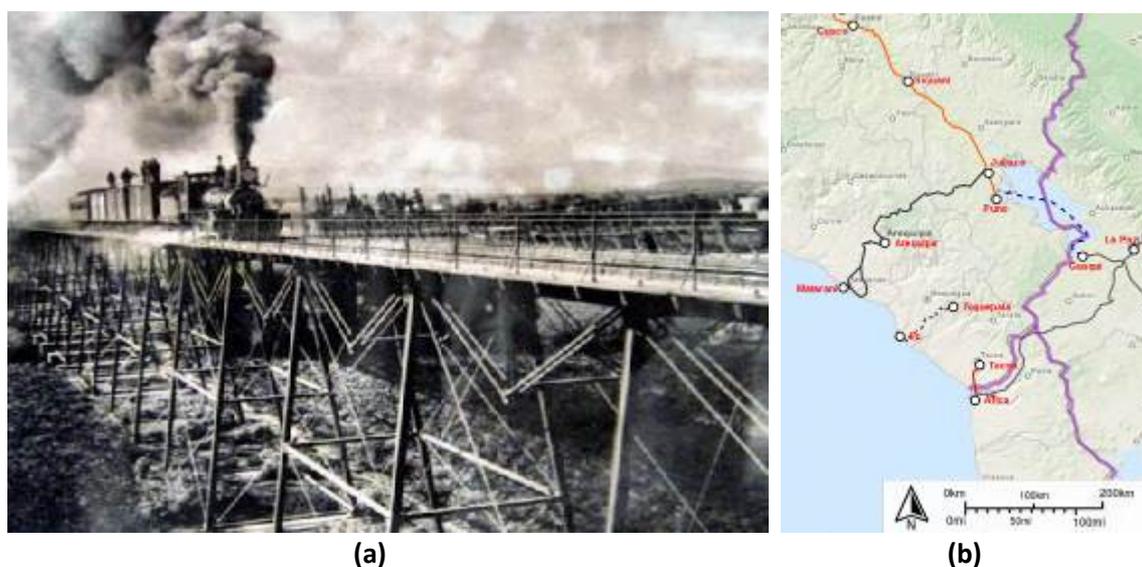
<https://www.cultura.gob.pe/sites/default/files/pagbasica/tablaarchivos/07/relaciondemonumentoshistoricos.pdf>. Acesso em: 18 agosto de 2019.



(a)

(b)

Figura 1 (a) - Localização de Arequipa no mapa do Perú; (b) Vista geral da estrutura da ponte Simón Bolívar, Arequipa (<https://www.geneanet.org/cartes-postales/view/6060974#0>)



(a)

(b)

Figura 2 (a) - Viaduto ferroviário Sul (Arquivo Regional de Arequipa); (b) Mapa da rede ferroviária (*Ferrocarilles el Sur*), indicando a localização de Arequipa em relação a Cusco, Puno e Tacna

Desde sua inauguração, a ponte passou de ferroviária à veicular e, atualmente, apenas para pedestres. Ao longo de seus 137 anos de serviço, nunca foram efetuados estudos da integridade estrutural da ponte usando técnicas de caracterização microestrutural dos seus elementos estruturais para verificar eventuais danos causados pela corrosão do meio, visto que existe uma produção agrícola sob a ponte. Estas informações serão fundamentais para os planos de restauração e de conservação da ponte.

O objetivo da pesquisa foi caracterizar os principais elementos estruturais da ponte para estimar seus respectivos valores de limite de escoamento a partir de medidas de dureza. O uso de técnicas de caracterização de materiais é fundamental para planos de conservação de patrimônios culturais e esses resultados obtidos constituem um registro das características e propriedades mecânicas dos elementos estruturais da ponte Simón Bolívar.

2. Materiais e Métodos

Foram retiradas amostras de diferentes áreas da ponte, cuidadosamente removidas com a permissão do Ministério da Cultura e Gestão do Centro Histórico de Arequipa. Pequenos fragmentos de quatro grupos da ponte (vide Figura 3) foram coletados, representando os principais elementos estruturais da ponte (com exceção dos tirantes), a saber: o pilar da ponte (coluna Phoenix), a base da coluna Phoenix e as vigas da base da ponte (vide Figuras 4a a 4d). As Tabelas 1 e 2 trazem as identificações das amostras.



Figura 3 - Localização das áreas onde os diferentes grupos de amostras dos elementos estruturais foram retiradas

Espectroscopia de emissão ótica (OES) foi utilizada conforme a norma ASTM A415-15 para a determinação da composição química das amostras de ferro pudlado. O ferro pudlado é um material maleável produzido entre o final do século XVIII e o final do século XIX a partir da descarburagem do banho de ferro gusa, em temperatura insuficiente para obter ferro totalmente líquido. Uma lança de ferro era introduzida na massa semissólida e, sendo girada, ia agregando ferro e escória até formar uma lupa de 250Kg, que era retirada do forno, forjada e laminada. De acordo com a American Society for Testing

Materials (ASTM), o ferro pudlado é um material refinado contendo quantidade uniformemente distribuída de escória. O ferro pudlado apresenta pouca heterogeneidade de composição química, sendo que o teor médio de carbono nos ferros pudlados encontra-se entre 0,018% e 0,030% (OLIVEIRA, 2017; BOUW, 2009). Segundo Revilla, os ferros pudlados fabricados na Europa entre 1850 e 1930 apresentam teores de silício próximos de 0,20%, enquanto os teores de fósforo chegam a 0,47% (REVILLA, 2005).

Para a caracterização microestrutural, as amostras foram lixadas com lixas de carbetto de silício com diferentes granulações de abrasivo (#200, #400, #600 e #1200) e, finalmente, polidas com alumina com diferentes tamanhos de abrasivo (6 μ m, 3 μ m e 1 μ m). As amostras metalográficas foram examinadas em microscópios óptico e eletrônico de varredura equipado com microanálise química EDS (espectrometria de raios-x por dispersão de energia, *energy dispersive spectroscopy*).

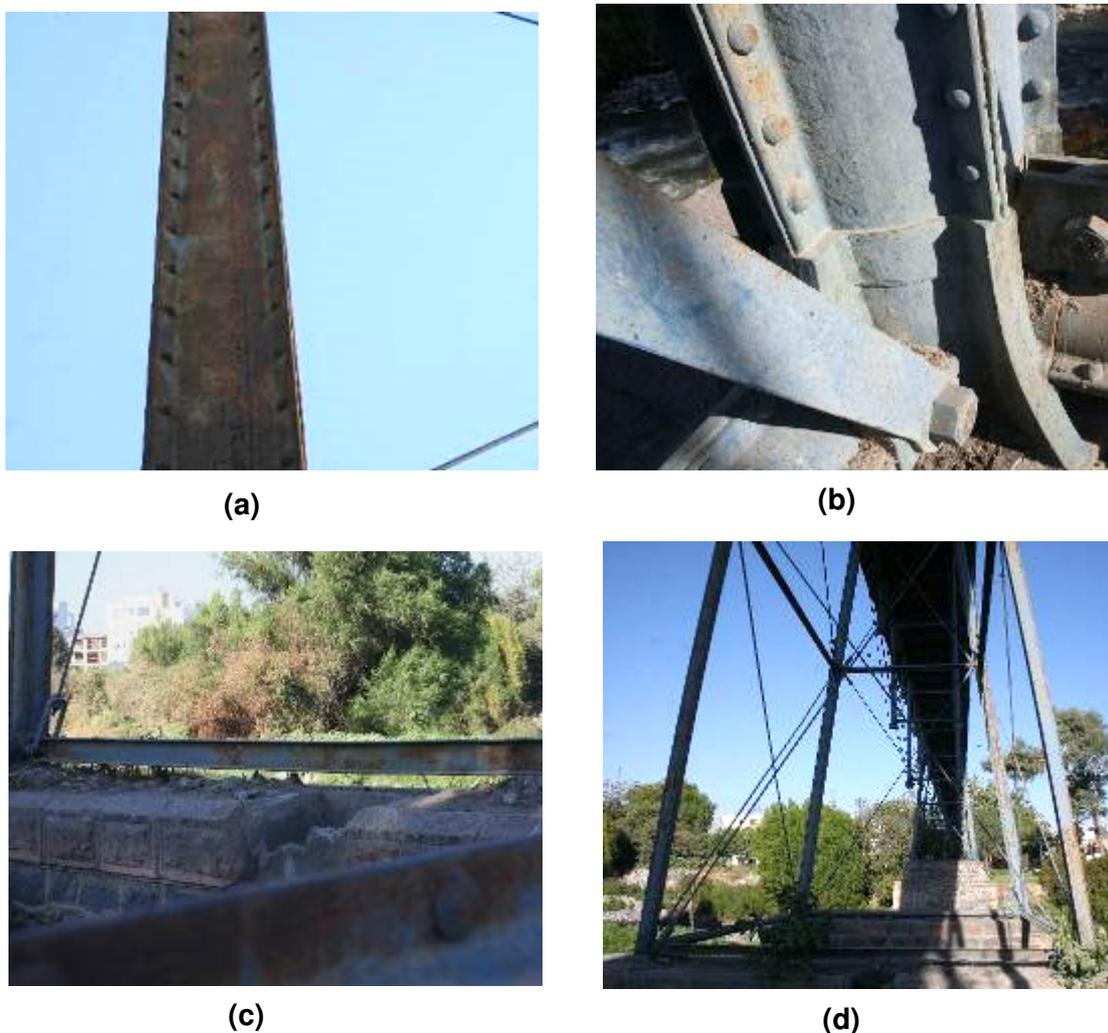


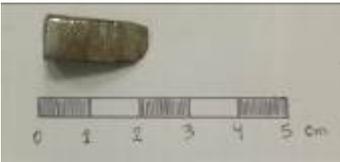
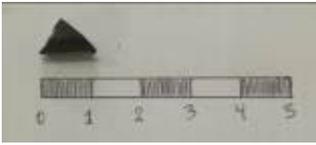
Figura 4 - (a) Pilar da ponte (coluna Phoenix); (b) Base da coluna Phoenix; (c). Viga transversal; (d) Vista geral da base da ponte

A determinação da dureza foi feita pelo método Rockwell B (penetrador de 1/16", carga de 100Kg, durômetro Indectec), conforme a norma ASTM E-18, e microdureza Vickers (300g de carga e 15 segundos), usando microdurômetro Shimadzu. Os valores do limite de escoamento foram estimados pelos valores de microdureza, enquanto os valores do módulo de Young foram obtidos pelo método de nanodureza.

Tabela 1 - Lista das amostras de acordo com seu grupo e descrição, amostras em negrito são de ferro fundido cinzento

Amostra	Descrição	Grupo	Código
1	Base da coluna Phoenix	1	BP-1
2	Coluna Phoenix	1	PP-1
3	Base da coluna Phoenix	1	BP-2
4	Viga transversal (base-ponte)	1	TP-1
5	Viga transversal (base-ponte)	1	TP-2
6	Coluna Phoenix	2	PP-2
7	Viga transversal (base-ponte)	2	TP-3
8	Viga transversal (base-ponte)	2	TP-4
9	Viga transversal (base-ponte)	2	TP-5
10	Coluna Phoenix	2	PP-3
11	Coluna Phoenix	3	PP-4
12	Viga transversal (base-ponte)	3	TP-6
13	Coluna Phoenix	3	PP-5
14	Coluna Phoenix	3	PP-6
15	Base da coluna Phoenix	3	BP-3
16	Base da coluna Phoenix	4	BP-4
17	Viga transversal (base-ponte)	4	TP-7
18	Pilar da ponte (coluna Phoenix)	4	PP-7
19	Base da coluna Phoenix	4	BP-5
20	Pilar da ponte (coluna Phoenix)	4	PP-8

Tabela 2 - Amostras removidas da ponte

		
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
		
Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
		
Amostra 7	Amostra 8	Amostra 9
		
Amostra 10	Amostra 11	Amostra 12
		
Amostra 13	Amostra 14	Amostra 15
		
Amostra 16	Amostra 17	Amostra 18
		
Amostra 19	Amostra 20	

3. Resultados

A análise química das amostras TP-1, PP-2 e PP5 por OES mostra teor de carbono abaixo de 0,056% e altos teores de fósforo (ultrapassa o limite máximo detecção do método, que é de 0,15%) e enxofre entre 0,07 a 0,15% (vide Tabela 3). O alto teor de silício é provavelmente advindo da sílica presente nas inclusões de escória, assim como parte do fósforo.

Tabela 3 - Análise química das amostras

Item	Percentual %		
	Amostra 4, TP-1	Amostra 6, PP-2	Amostra 13, PP-5
C	0,056	0,035	0,041
Mn	0,041	0,079	0,022
Si	1,52	2,98	1,16
P	> 0,15	> 0,15	> 0,15
S	0,12	>0,15	0,072
Ni	0,018	2,01	0,016
Cr	0,15	0,029	0,013
Cu	0,018	0,07	0,014
Al	0,43	0,32	0,5
V	0,17	0,046	0,026
Co	0,22	0,03	0,016
Nb	0,019	<0,003	0,012
W	0,37	0,2	0,2
Fe	96,1	93,3	97,1

A microestrutura, formada por uma matriz de grãos equiaxiais de ferrita e inclusões não metálicas (alongadas e equiaxiais) ao longo dos contornos de grãos ferríticos, somada à composição química, indicam tratar-se de ferro pudlado (Stötzel, 1997; Revilla, 2005). As numerosas inclusões de diferentes tamanhos ocupam uma fração volumétrica entre 8 a 13% (vide Figuras 5a a 5d).

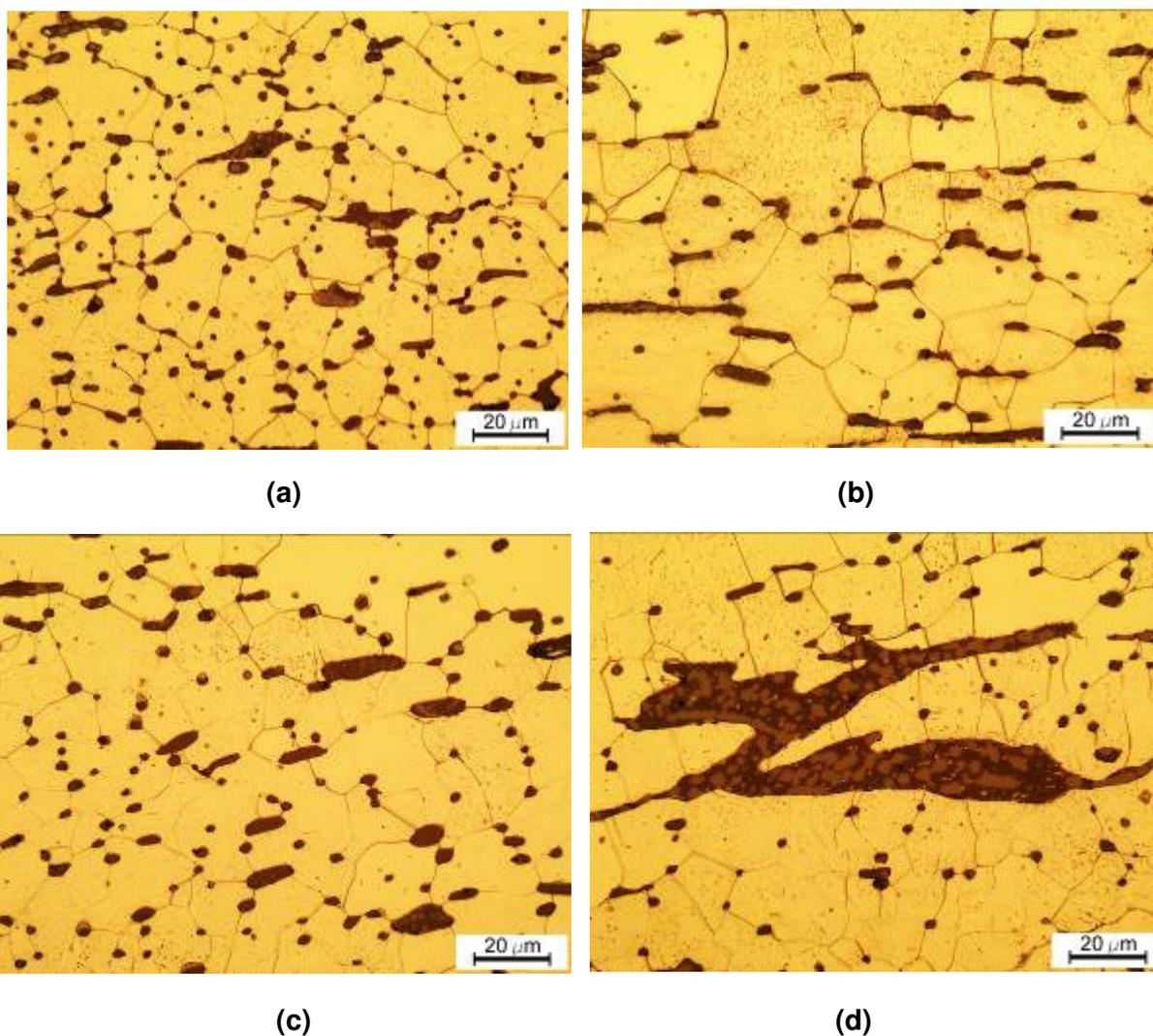


Figura 5 - Caracterização microestrutural das amostras metalográficas de ferro pudlado atacadas com 5% de Nital (pilar da coluna tipo Phoenix e viga transversal). (a) Amostra 4, TP-1, 50x; (b) Amostra 6, PP-2, 50x; (c) Amostra 13, PP-5, 50x; (d) Amostra 13, PP-5, 50x. Microscopia ótica

Inclusões não metálicas encontradas nas amostras de ferro pudlado foram examinadas em mais detalhe (vide Figuras 6a a 6d). Estas inclusões são formadas de matriz multifásica, área escura, e dendritas de wustita (FeO), área clara, e são tipicamente encontradas em objetos ferrosos produzidos antes do século XX e seus resultados de microanálise química de acordo com vários estudos (DILLMANN, 2007; BLAKELOCK, 2009; MAIA, 2015; MAMANI-CALCINA, 2017) podem ser usados para investigar a origem dessas peças e seus detalhes produtivos. Os resultados de microanálise química EDS da fase wustita de inclusões não metálicas de 3 amostras de ferro pudlado são indicados na Tabela 4 (foi imposto, durante a análise dos resultados, que os elementos se encontravam na forma daqueles óxidos).

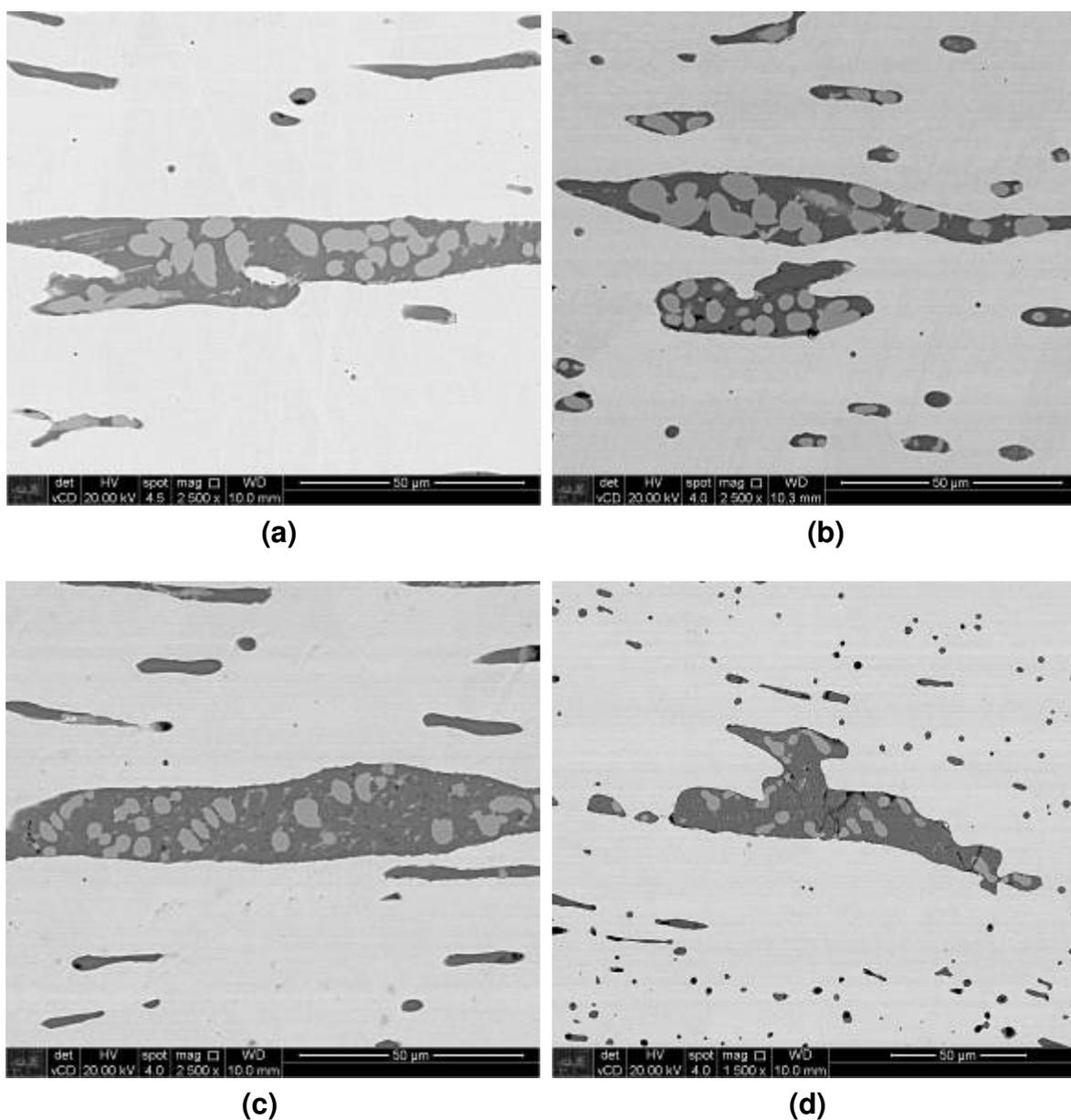


Figura 6 - Microestrutura das inclusões não metálicas do ferro pudlado. (a) Amostra 4, TP-1, (b) Amostra 6, PP-2, (c) Amostra 13, PP-5 (d) Amostra 17, TP-7. Microscopia eletrônica de varredura, imagem de elétrons retroespalhados

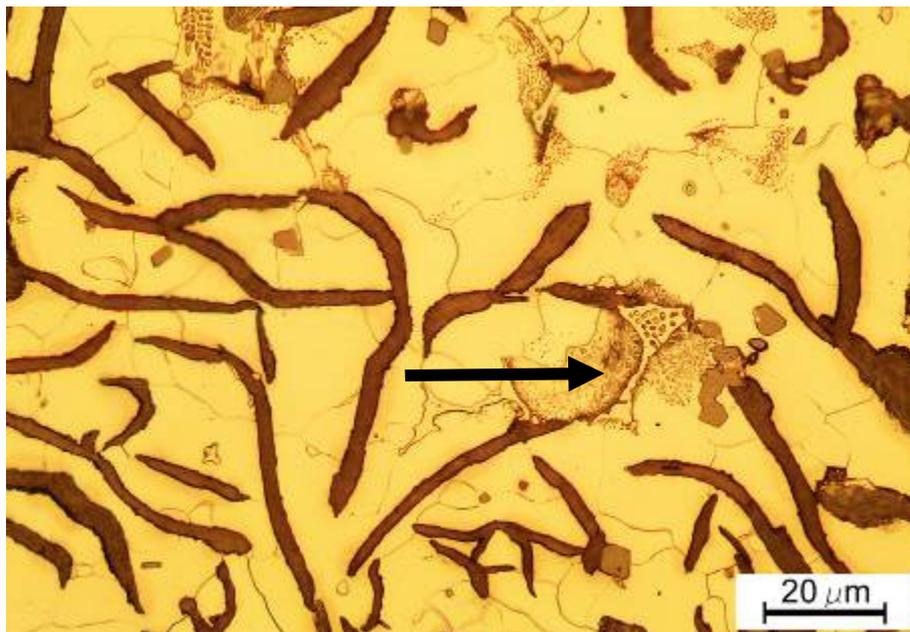
Tabela 4 - Microanálise química da fase wustita das inclusões não metálicas de três amostras de ferro pudlado

Amostras	Microanálise química	
	Oxido	Teor (% em massa)
Amostra 4 TP-1	Al ₂ O ₃	0.2
	SiO ₂	0.3
	TiO ₂	0.4
	V ₂ O ₅	1.0
	FeO	97.9
Amostra 6 PP-2	Al ₂ O ₃	0.3
	SiO ₂	0.3
	TiO ₂	0.4
	V ₂ O ₅	0.6
	MnO	0.2
	FeO	98.3
Amostra 14 PP-5	Al ₂ O ₃	0.8
	SiO ₂	0.7
	P ₂ O ₅	0.2
	TiO ₂	0.6
	V ₂ O ₅	0.9
	MnO	0.2
	FeO	96.4

A microestrutura do ferro fundido cinzento revelou veios de grafita do tipo A em matriz ferrítico-perlítica, com presença de steadita (vide setas) – microconstituente eutético ternário, formado pela transformação da fase líquida remanescente em Fe (austenita), carboneto de ferro (Fe₃C) e fosfeto de ferro (Fe₃P) – comum em ferro gusa (vide Figuras 7a e 7b) (STEFANESCU, 2008; HILLERT, 1975). Os resultados de dureza Rockwell B (vide Tabela 4) foram usados para estimar o limite de escoamento dos ferros pudlados (valor estimado em MPa), multiplicando o valor da dureza Rockwell B pelo valor de 4,51, seguindo correlação proposta (BOWMAN, 2014).



(a)



(b)

Figura 7 - Caracterização microestrutural das amostras de ferro fundido cinzento (base da coluna Phoenix), mostrando veios de grafita, steadita (setas) e matriz ferrítico-perlítica. (a) Amostra BP-1, 20x; (b) Amostra BP-1, 50x. Microscopia ótica, Ataque com Nital 5%

Os resultados de microdureza Vickers (vide Tabela 5) das amostras de ferro pudlado apresentaram valores entre 135 e 198HV, sugerindo que esta heterogeneidade é decorrente da presença subsuperficial de inclusões de escória. Os resultados dos módulos de Young são mostrados na Tabela 6.

Tabela 5 - Medições de dureza Rockwell B em amostras de ferro pudlado (5 medidas) e o valor estimado do limite de escoamento

Amostra	Dureza HRB	Limite de escoamento (MPa)	Amostra	Dureza HRB	Limite de escoamento (MPa)
2	84	379	11	75	339
4	63	284	12	87	393
5	47	213	13	59	266
6	71	231	14	70	316
7	74	334	17	81	366
8	70	316	18	73	330
9	63	285	20	68	307
10	73	330			

Tabela 6 - Valores de microdureza Vickers da ferrita presente nas amostras de ferro pudlado (média de 7 determinações)

AMOSTRA	Dureza HV	AMOSTRA	Dureza HV	AMOSTRA	Dureza HV
2	135	7	198	12	145
4	153	10	142	17	139
5	151	11	160	18	143

Tabela 7 - Valores do módulo de Young das amostras de ferro pudlado por nanoindentação da matriz ferrítica

AMOSTRA	E (GPa)
4	198
6	198
7	192
13	187

4. Discussão

Os ferros pudlados podem ser identificados pela sua quantidade de inclusões de escória e distribuição heterogênea dos grãos de ferrita (Stötzel, 1997; Revilla, 2005). As amostras de ferro pudlado da ponte (colunas Phoenix e vigas transversais) apresentaram teor de carbono de 0,056% e altos valores de silício, fósforo e enxofre, vide Figuras 3 e 4 e Tabela 3. Os teores de silício e fósforo são afetados pela presença desses elementos nas inclusões de escória. Suas microestruturas revelaram matriz ferrítica de grãos equiaxiais, de tamanhos variados, com expressiva fração volumétrica de inclusões de escória (8 a 13%), vide Figuras 5a a 5d, condições que diferenciam o ferro pudlado dos aços Bessemer e Siemens Martin, muito mais limpos, que começavam a ser utilizados naquela época. Os valores de dureza das amostras de ferro pudlado variaram entre 47 e 87 HRB, vide Tabela 4, sendo que estes valores são afetados pelo teor de fósforo da matriz ferrítica, e estão em acordo com os valores encontrados em outras estruturas históricas de ferro pudlado (REVILLA, 2005; BUONOPANE, 1886).

Os valores estimados de limite de escoamento para os elementos estruturais fabricados em ferro pudlado (colunas de Phoenix e vigas transversais) estão entre 213 e 393MPa, vide Tabela 4. Estes valores estão em acordo com os valores de limite de escoamento encontrados para o aço SAE 1010 e para o ferro comercialmente puro (ambos na condição recozida), que ficam entre 250MPa a 350MPa². Os valores estimados do módulo de rigidez das amostras de ferro pudlado, média de 194GPa vide Tabela 6, estão um pouco abaixo dos valores típicos (entre 204 e 215GPa) encontrados para o aço 1010 e para o ferro comercialmente puro, ambos na condição recozida. As estimativas dos limites de escoamento e do módulo de elasticidade dos ferros pudlados, no entanto, desconsideram a presença de inclusões não-metálicas (fração volumétrica de aproximadamente 10%), que também atuam como concentradores de tensão, indicando que os valores “reais” do limite de escoamento e do módulo de rigidez dos elementos estruturais fabricados em ferro pudlado (colunas de Phoenix e vigas transversais) devem ser aproximadamente 25% abaixo dos valores estimados.

As inclusões de escória dos ferros pudlados apresentaram microestrutura duplex, vide Figuras 6a a 6d, constituída de matriz predominantemente rica em SiO₂ e dendritas de fase wustita, confirmando resultados da literatura (DILLMANN, 2007; BLAKELOCK, 2009; MAIA, 2015; MAMANI-CALCINA, 2017). Os resultados de microanálise química, vide Tabela 4, das inclusões de escória da Ponte Simón Bolívar (produzida pela empresa

² Granta Design. Cambridge Engineering Selector Software, 2019.

americana *Phoenix Iron Company*) apresentaram maiores teores de V_2O_5 e menores teores de TiO_2 e MnO , quando comparados aos resultados dos elementos estruturais da Ponte Dom Pedro II (localizada na Bahia, inaugurada em 1885 e produzida pela empresa escocesa *Mossend Iron and Steel Works*) (MAMANI-CALCINA, 2017). Estes resultados comprovam como ferros pudlados de diferentes proveniências possuem inclusões de escória com composições químicas características de cada processo produtivo (DILLMANN, 2007; BLAKELOCK, 2009; MAIA, 2015; MAMANI-CALCINA, 2017).

Adicionalmente, os elementos estruturais da Ponte Dom Pedro II (MAMANI-CALCINA, 2017) apresentam menor nível de inclusões (aproximadamente 6%) do que os componentes de ferro pudlado da Ponte Simón Bolívar (aproximadamente 10%), sugerindo que o controle do processo de fabricação de ferro pudlado na Escócia (*Mossend Iron and Steel Works*) era mais avançado do que nos EUA (*Phoenix Iron Company*), visto que os produtos foram manufaturados na mesma época e possuem diferentes teores de inclusões de escória.

Finalmente, as bases das colunas Phoenix foram manufaturadas em ferro fundido cinzento com matriz ferrítico-perlítica, que apresentam hoje em dia valores típicos de limite de escoamento entre 65 e 98MPa. Vale ressaltar que a microestrutura dos ferros fundidos das bases das colunas Phoenix apresentou microconstituente eutético duro e frágil (steadita), sugerindo que seus valores de limite de escoamento também devem estar abaixo dos valores típicos.

Conclusões

1. A análise dos resultados da composição química, microestrutura e fração volumétrica de inclusões de escória indicam que as vigas transversais e as colunas Phoenix da ponte Simón Bolívar foram manufaturadas em ferro pudlado, enquanto as bases das colunas Phoenix foram produzidas em ferro fundido cinzento ferrítico-perlítico com presença de steadita.
2. Estima-se que os valores de limite de escoamento das colunas Phoenix e das vigas da ponte da Simón Bolívar variem de 160 e 300MPa, enquanto o módulo de rigidez é próximo de 190GPa.
3. Os valores das propriedades mecânicas estimados no presente trabalho poderão ser usados para os cálculos de integridade estrutural da ponte por análise por elementos finitos para carregamento mecânico estático e dinâmico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Nacional de San Agustín de Arequipa-Peru, Vice-Reitoria de Pesquisas, UNSA Investiga. Os professores Cesar R.F. Azevedo e Fernando J. G. Landgraf, ambos da EPUSP, agradecem ao CNPq pelas suas bolsas de produtividade em pesquisa e ao inestimável apoio prestado pelo Conselho à investigação científica e tecnológica no Brasil desde 1951.

Referências

BLAKELOCK, E.; MARTINON-TORRES, M.; VELDHUIJZEN, V.H.; YOUNG, T. Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study. *Journal of Archaeological Science*, v.36, p. 1745-1757, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.03.032>. Acesso em: 12 ago. 2019.

BOUW, M.; WOUTERS, I.; VEREECKEN J.; LAURIKS L. Iron and steel varieties in building industry between 1860 and 1914 - A complex and confusing situation resolved. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 8, p. 2775-2787, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.03.009>. Acesso em: 12 ago. 2019.

BOWMAN, M.; PISKOROWSKI, A. Evaluation and repair of wrought iron and steel structures in Indiana. *JTRP Technical Reports*, Purdue University, p. 77-82, 2004. Disponível em: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1555&context=jtrp>. Acesso em: 18 ago. 2019.

BUONOPANE, S.; KELTON, S. Mechanical Properties of Wrought Iron from Penns Creek Bridge (1886). In: *Historic Bridges: Evaluation, Preservation, and Management*. Boca Raton: CRC Press, Columbus, Ohio, 2008. p. 167-184. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429150807>. Acesso em: 12 ago. 2019.

DILLMANN, P.; M. L'HÉRITIER. Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science*, v. 34, p. 1810-1823, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.12.022>. Acesso em: 12 ago. 2019.

GUTIERREZ-PINTO, D. (2013). Gustave Eiffel En El Peru 1870 -1890: proyectos y obras. Tesis de maestria. Universidad Nacional de Ingeniera, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Artes, Lima, Peru FAUA-UNI, 2013. Editorial Roel S.A.C.

HILLERT, M.; SÖDERHOLM, P.O. White and Gray Solidification of the Fe-C-P Eutectic. In: LUX, B.; MINKOFF, I.; MOLLARD, F. (Eds.). *Proceedings of the Second International Symposium on the Metallurgy of Cast Iron*, Geneva, Switzerland, May 29-31, 1974. Georgi Publishing, 1975. p. 197.

MAIA, R. R., DIAS, M.S.; AZEVEDO, C.R.F.; LANDGRAF, F.J.G. Archaeometry of ferrous artefacts from Luso-Brazilian archaeological sites near Ipanema River, Brazil. *REM: Revista da Escola de Minas*, v. 2, p. 187-193, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672015680151>. Acesso em: 12 ago. 2019.

MAMANI-CALCINA, E. A.; LANDGRAF, F. J. G.; AZEVEDO, C. R. F. Investigating the provenance of iron artifacts of the Royal Iron Factory of São João de Ipanema by hierarchical cluster analysis of EDS microanalyses of slag inclusions. *Materials Research*,

v. 20, p. 119-129, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0444>. Acesso em: 12 ago. 2019.

NEUMAN, W. Despite Rumors, not everything that towers is Eiffel's. *New York Times*, October 26th 2014. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2014/10/29/world/americas/despite-rumors-not-everything-that-towers-is-eiffels.html>. Acesso em: 12 ago. 2019.

OLIVEIRA C. M. *Uma abordagem das propriedades mecânicas e microestruturais do ferro pudlado empregado em estruturas centenárias*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Fluminense, 2017, 64 p. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/4535/1/Projeto%20Final%20-%20Camila%20v17.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2019.

PINTO-RODRÍGUEZ, G. *Puente de Fierro*: Breve historia de una joya de ingeniería en Arequipa – Perú. Universidad Católica San Pablo. Disponível em: <https://ucsp.edu.pe/saladeprensa/articulos/puente-de-fierro-breve-historia-de-una-joya-de-ingenieria-en-arequipa-peru/>. Acesso em: 12 ago. 2019.

REVILLA, J. *Integridad estructural de vigas roblonadas de acero estructural antiguo*. Tesis, Doctorado en Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Madrid, 2005. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/11990292>. Acesso em: 18 ago. 2019.

STEFANESCU, D. M. Thermodynamic Properties of Iron-Base Alloys. In: *ASM Handbook*, v. 15, Casting, ASM International, p. 41-55, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3580.1442>. Acesso em: 12 ago. 2019.

STÖTZEL, G.; SEDLACEK, G; LANGERBERG, P.; DAHL, W. Material Identification and Verification for the Residual Safety of Old Steel Bridges. IABSE Workshop (Lausanne), Group Theme F, Fatigue Assessment. v. 76, p. 241-251, 1997. Disponível em: <http://doi.org/10.5169/seals-57478>. Acesso em: 12 ago. 2019.