



38th SENAFOR

22nd International Forging Conference - Brazil

8th International Sheet Metal Forming Conference/5th BrDDRG Congress

7th International Powder Metallurgy Conference Brazil

8th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energy

Combinação de meios de Resfriamento para a Redução da Ocorrência de Trincas em Têmpera de Barras Forjadas / Quenchant Combination for Cracking Reduction in Forged Bars / 38th SENAFOR

Mariana Medeiros ⁽¹⁾
Pedro M. Araújo Stemler ⁽²⁾
Alisson S. Duarte ⁽³⁾

Abstract

The industrial process of thermal treatments involves the control of several parameters such as temperature, time and cooling medium. It becomes more complex due to the wide range of geometries and the short delivery time need to the customer. Therefore, the present paper aimed to obtain a FE model, in order to validate a quenching process in water, and predict the appearance of fractures. Simulation were conducted based on a 6 ½" cylinder, SAE 4140 steel, for soil drilling. The application analyzed part presented cracks, and the simulations allowed validating the occurrence of the fractures in this process. It took into consideration a collective analysis of the effect obtained in the microstructures and, as consequence, the emergence of tensile tensions caused by the superficial formation of martensite, fragile microstructure and bainite to the center, tenacious microstructure. Furthermore, predicting the appearance of cracks and understanding the beginning and propagation of cracks in a heat treatment is a difficult task when based on the common tryout practices on the shop floor. However, it was possible through the simulations to provide a more assertive selection regarding the best cooling medium, including possible combinations such as oil, water and time of the heat treatment, besides clarifying and predicting the mechanism of new fractures.

⁽¹⁾ Mariana Medeiros: Vendedora Técnica, SIXPRO Virtual&Practical Process, mariana.medeiros@sixpro.pro

⁽²⁾ Pedro Malaquias Araújo Stemler: Especialista de Simulação, SIXPRO Virtual&Practical Process, pedro.stemler@sixpro.pro

⁽³⁾ Alisson S. Duarte: Professor, Escola de Engenharia da UFMG, alissonds@ufmg.br e Consultor Técnico, SIXPRO Virtual&Practical Process, alisson@sixpro.pro

Key words — Simulation, Finite element method, Cracking, Quenching, Heat treatment, Quenchant combination.

Resumo

O processo industrial de tratamentos térmicos envolve o controle de diversos parâmetros como temperatura, tempo e meios de resfriamento. Estes tornam-se ainda mais complexos devido às diferentes geometrias trabalhadas e o curto tempo de acerto do processo e entrega do produto ao cliente. Portanto, o presente artigo visou obter um modelo numérico, fundamentado pelo método dos elementos finitos, afim de demonstrar um processo de têmpera em água e prever o surgimento de fraturas. Toda simulação foi embasada envolvendo um cilindro de 6 ½”, em aço SAE 4140, aplicado à perfuração de solos. A peça estudada apresentava trincas e as simulações permitiram entender a ocorrência das fraturas neste processo, levando em consideração uma análise conjunta do efeito das microestruturas obtidas e, como consequência, o surgimento de tensões trativas devido a formação superficial de martensita, microestrutura frágil, e de bainita ao centro, microconstituente tenaz. Obter um direcionamento mais assertivo quanto à previsão do aparecimento de trincas e entender o início e propagação das mesmas, em um tratamento térmico, configura-se em uma tarefa difícil quando baseada nas práticas de tryouts comuns em chão de fábrica. No entanto, foi possível através das simulações fornecer um direcionamento mais assertivo quanto ao melhor meio de resfriamento, possíveis combinações como óleo e água e tempo do tratamento térmico, além de esclarecer e prever o mecanismo de novas fraturas.

Palavras-chave: Simulação, Elementos finitos, Trincas, Têmpera, Tratamento térmico, Combinação de meios de resfriamento, Fratura.

1 INTRODUÇÃO

O tratamento térmico de têmpera consiste em aquecer o material até a temperatura de austenitização e resfriá-lo rapidamente, afim de se obter uma estrutura muito dura chamada martensita. As propriedades obtidas por intermédio desse tratamento é que possibilitam o emprego do aço em situações de maiores esforços mecânicos [1].

A velocidade de resfriamento deve ser tal que não dê tempo ao carbono de se difundir pela matriz, ficando aprisionado no reticulado cúbico centrado do ferro alfa. Esse aprisionamento causa a distorção desse reticulado que passa a ser tetragonal e possuir extrema dureza devido ao aumento das tensões internas na célula. A taxa de resfriamento para obtenção da martensita varia para cada material, levando em consideração a composição, o tamanho de grão e a homogeneidade da austenita para sua formação [2]. O principal é que deve ser sempre realizada em um tempo menor que o de formação de outras fases, como pode ser observado no diagrama TTT representado pela Figura 1.

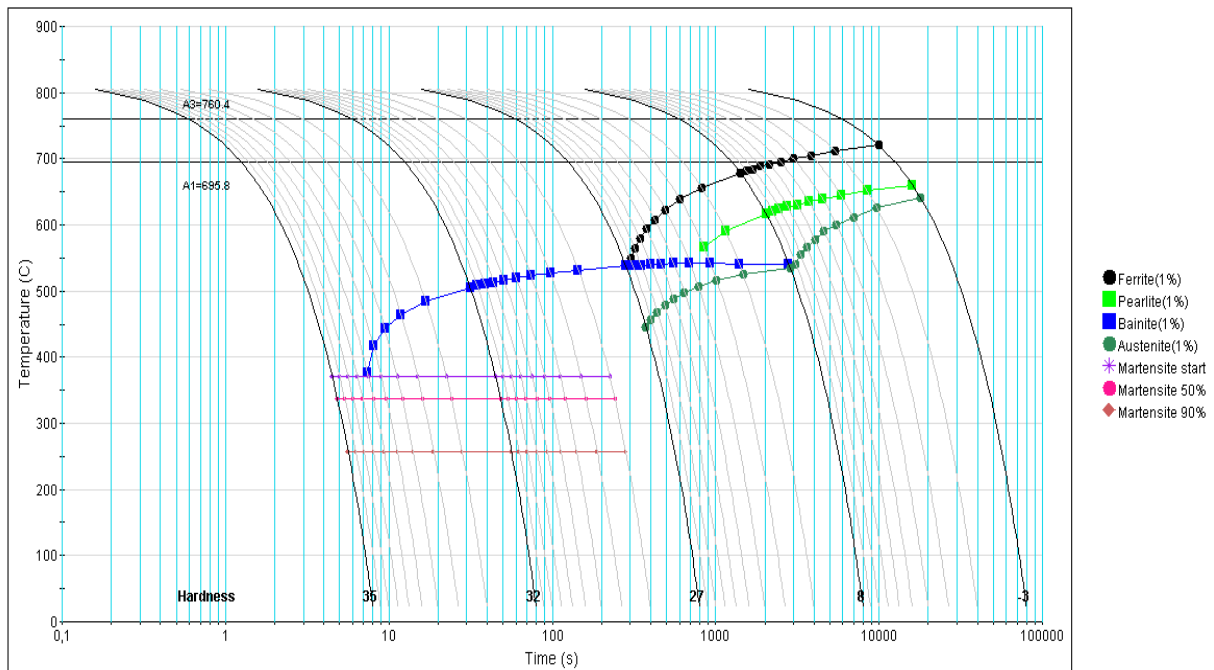
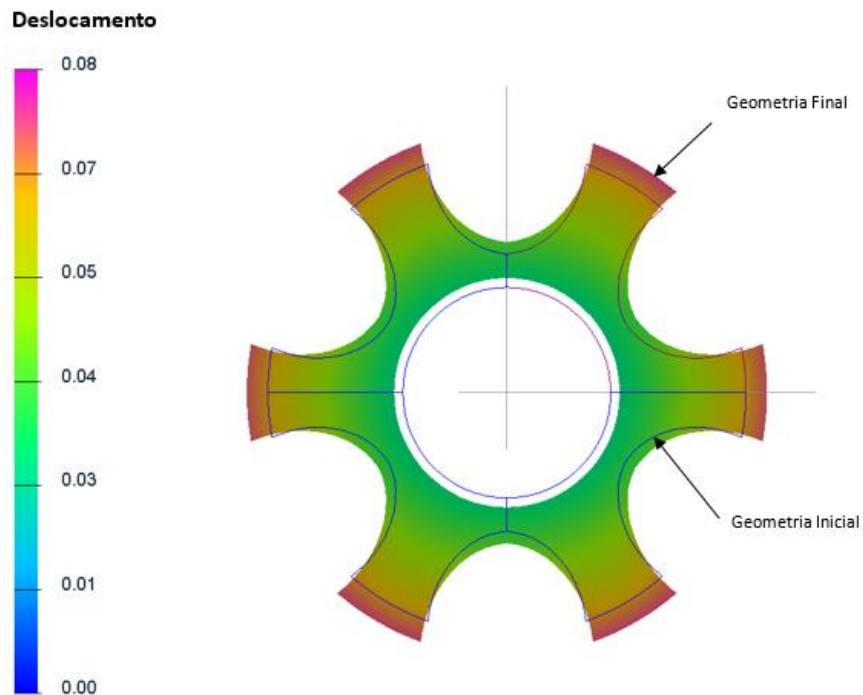


Figura 1: Diagrama TTT para o aço SAE 3310 (JMatPro®, V.10.1).

Dependendo das dimensões da peça a ser temperada, pode-se obter microestruturas mistas, pois é possível que o núcleo ou regiões mais espessas não dissipem o calor rapidamente, levando a formação de fases diferentes. Ao passo que as propriedades mecânicas sofrem grandes alterações nas peças temperadas surgindo tensões, quer de natureza térmica, devido à expansão/contração do material, quer de natureza estrutural, devido às mudanças de fase. Para se aliviar essa fragilização provocada realiza-se um processo chamado revenido nas peças, que alivia um pouco essas tensões conferindo à fase martensítica um pouco mais de tenacidade. O processo de revenimento consiste em aquecer o material a temperaturas abaixo da temperatura de transformação da austenita. O revenido permite que as distorções elásticas sejam minimizadas e uma parcela dos carbonos presos se difunda, procedimento que torna o aço mais tenaz sem reduzir muito o limite de escoamento do mesmo [1].

Outro grande problema durante o processo é a deformação não homogênea que ocorre devido à variação das taxas de trocas térmicas no decorrer do resfriamento. Se inicialmente têm-se somente austenita no material a ser temperado, dependendo da taxa de resfriamento em cada região do mesmo, poderá se obter ferrita, perlita, bainita ou martensita. Devido a esta quantidade de fase transformada não ser homogênea e às diferentes variações volumétricas de cada microestrutura, as tensões internas do material aumentam e ultrapassam o limite de escoamento do aço, deformando-o e até mesmo trincando. A Figura 2 exemplifica a deformação da geometria de uma engrenagem após o processo de cementação seguido de têmpera.



*Deslocamento da geometria final aumentado 50x.

Figura 2: Previsão da distorção em uma engrenagem após cementação e têmpera por elementos finitos [3].

A simulação computacional, baseada no método dos elementos finitos, tem se tornado uma importante ferramenta para a compreensão dos mecanismos de distorções que ocorrem durante os tratamentos térmicos e/ou termoquímicos. O modelo de elementos finitos, em simulações envolvendo tratamento térmicos, considera uma complexa interação entre a deformação, temperatura, teores de carbono e transformação de fase. A Figura 3 demonstra como esses fenômenos estão interligados.

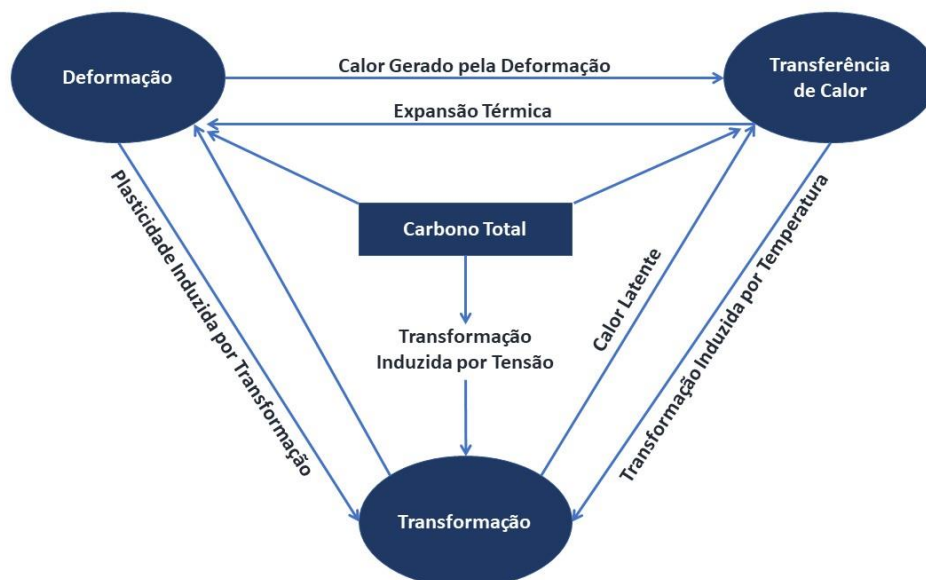


Figura 3: Relação entre os fenômenos de deformação, transferência de calor e transformação de fases a serem considerados durante as simulações de tratamento térmico [4].

Para obter resultados similares à prática durante a simulação, os dados dos materiais devem ser calculados de forma precisa. As informações apresentadas a seguir das propriedades dos materiais devem ser bem conhecidas para a predição da distorção causada durante a têmpera através de simulações numéricas [4]:

- Cinética da transformação de fases, ou seja, diagramas TTT e CCT;
- Propriedades termofísicas dependentes da temperatura para cada uma das fases formadas, como densidade, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica;
- Propriedades mecânicas dependentes da temperatura para cada uma das fases, o que inclui resistência à tração, limite de escoamento e dureza.

Dentre os softwares capazes de fornecer modelos de materiais, o JMatPro® é um software que calcula uma ampla gama de propriedades de materiais para ligas com multicomponentes, de forma que os dados do material podem ser organizados em um formato que pode ser facilmente lido, sendo imputados como entradas para o processamento da simulação computacional [5].

Os modelos de elementos finitos para tratamento térmico consideram uma complexa interação entre deformação, temperatura, transformação e difusão. Quando o objetivo da simulação é relacionado a distorções, o modelo considera a deformação referente aos componentes das taxas de deformação baseadas na Equação (1).

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{total} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p + \dot{\epsilon}_{ij}^{th} + \dot{\epsilon}_{ij}^{tr} + \dot{\epsilon}_{ij}^{tp} \quad (1)$$

em que e, p, th, tr e tp representam as componentes de transformações elástica, plástica, térmica, transformação de fases e plasticidade, respectivamente. A transformação de fase ocorre da fase i para a fase j. O modelo cinético é uma função que define as condições e o modo na qual uma fase se transforma em outra. A força-motriz de algumas transformações é determinada por processos de difusão, que dependem da temperatura, histórico de tensão e composição química.

2 METODOLOGIA

Prever a formação de trincas provenientes dos esforços térmicos do tratamento aplicado depende inicialmente dos dados do material. Logo, utilizou-se o software JMatPro® para a simulação e a obtenção das propriedades físicas e metalúrgicas do aço SAE 4140. As simulações do processo de têmpera foram realizadas através do software com base no Método dos Elementos Finitos DEFORMTM -HT para a previsão de trincas circunferenciais em um cilindro de diâmetro de 6 1/2". Utilizou-se os coeficientes de transferência térmica da água e o do óleo para determinar o tempo de resfriamento para ambos os meios [5].

A Figura 4 demonstra a fratura circunferencial de um processo real de têmpera de um cilindro com diâmetro de 6 1/2". Inicialmente, para a representação do modelo que apresentava fratura, simulou o processo de têmpera em água. Após os resultados condizerem com a prática, prosseguiram-se com as simulações em busca da melhor condição e combinação dos meios de têmpera para eliminar ou amenizar a trinca circunferencial provinda do processo real.



Fratura
circunferencial

Fratura
circunferencial



Figura 4: Trincas após têmpera em cilindro de diâmetro de 6 ½”.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Obteve-se as frações volumétricas de martensita obtidas após a primeira simulação onde representou-se o processo: têmpera em água (Figura 5):



Figura 5: Fração volumétrica de martensita após têmpera em água, em cilindro com diâmetro de 6 ½”.

Após a simulação da têmpera em água, o cilindro de aço SAE 4140 apresentou regiões próximas à superfície (cores escuras) com elevada quantidade de martensita. Portanto, essas regiões possuem altas dureza e fragilidade, sendo então, mais susceptíveis à ocorrência de fratura. Pode-se correlacionar as regiões com maior fração de martensita formada com as áreas onde ocorreram as trincas circunferenciais no cilindro (Figura 6).

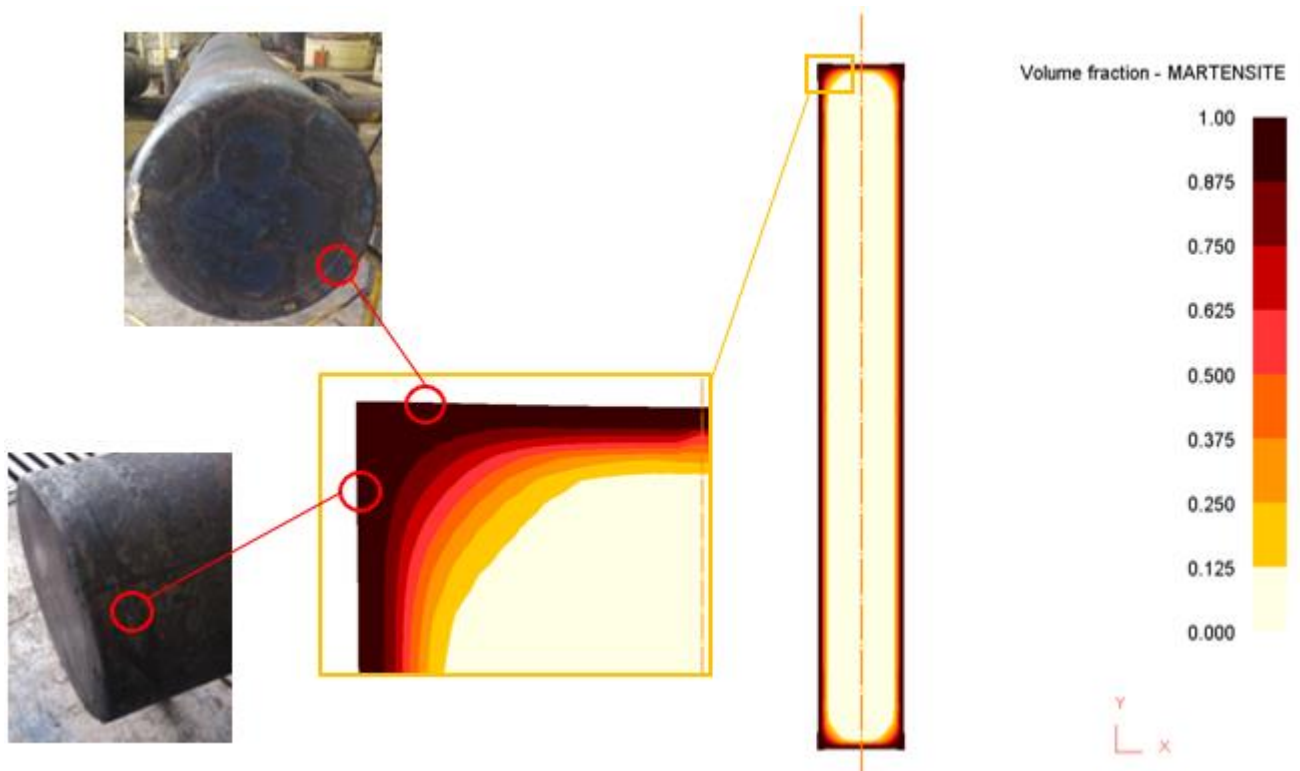


Figura 6: Correlação entre a fração volumétrica de martensita após têmpera em água, em cilindro com diâmetro de 6 ½", e ocorrência de Trincas.

Apenas a existência de martensita na região superficial como mostrado na Figura 6 não explica a ocorrência das trincas formadas. Porém, foi realizada a análise das tensões nas direções radial (Figura 7) e axial (Figura 8) do cilindro. Sabe-se que tensões positivas, logo trativas, são as responsáveis pela ocorrência de fraturas. Isso foi possível ser demonstrado e avaliado pela simulação e demonstrou que na direção radial a maior tensão positiva, cerca de 1160 MPa, se deu no mesmo ponto onde ocorreu trinca no cilindro real como demonstrado (Figura 6). O mesmo fato ocorreu na direção axial do cilindro, representando mais uma vez a ocorrência de fratura nesta direção conforme correlacionado pela Figura 8.

A ocorrência da fratura circunferencial foi então possível ser comprovada devido a presença de tensões trativas nas regiões de ocorrência. Porém, a análise individual das tensões nas direções radial e axial, também não explicam o mecanismo da fratura. Para isso, foi analisado a máxima tensão principal em todo o cilindro para entender o início e a propagação da trinca formada conforme Figura 9. Ao analisar a máxima tensão principal as duas regiões com os maiores valores positivos foram justamente as regiões que se apresentaram trincadas durante o processo industrial. Porém, a região pertencente à direção axial apresentou maiores tensões trativas, cerca de 2040 Mpa, tendo a região pertencente à direção radial a segunda maior em valores de tensões trativas. Esse resultado fornece a possibilidade que o mecanismo de fratura se iniciou pela direção axial se propagando para direção radial do cilindro.

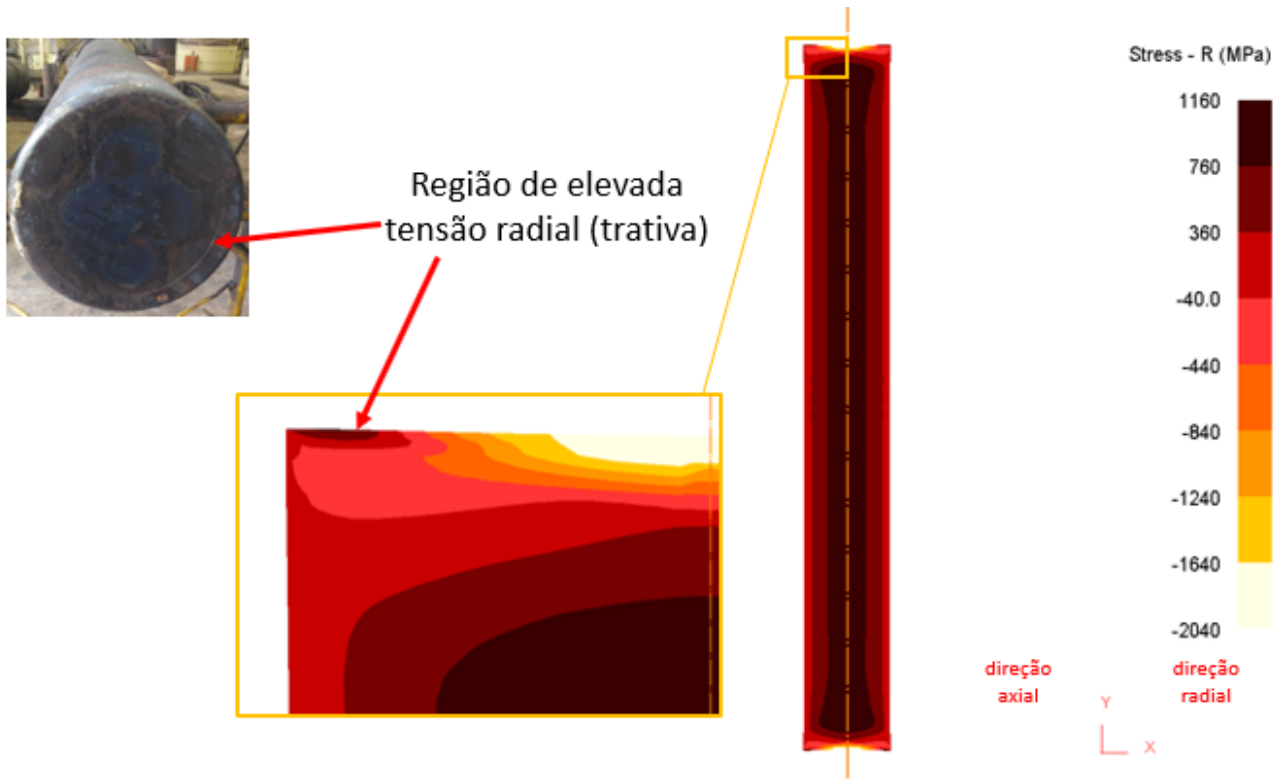


Figura 7: Correlação entre a ocorrência de fratura na direção radial e presença de tensões trativas.

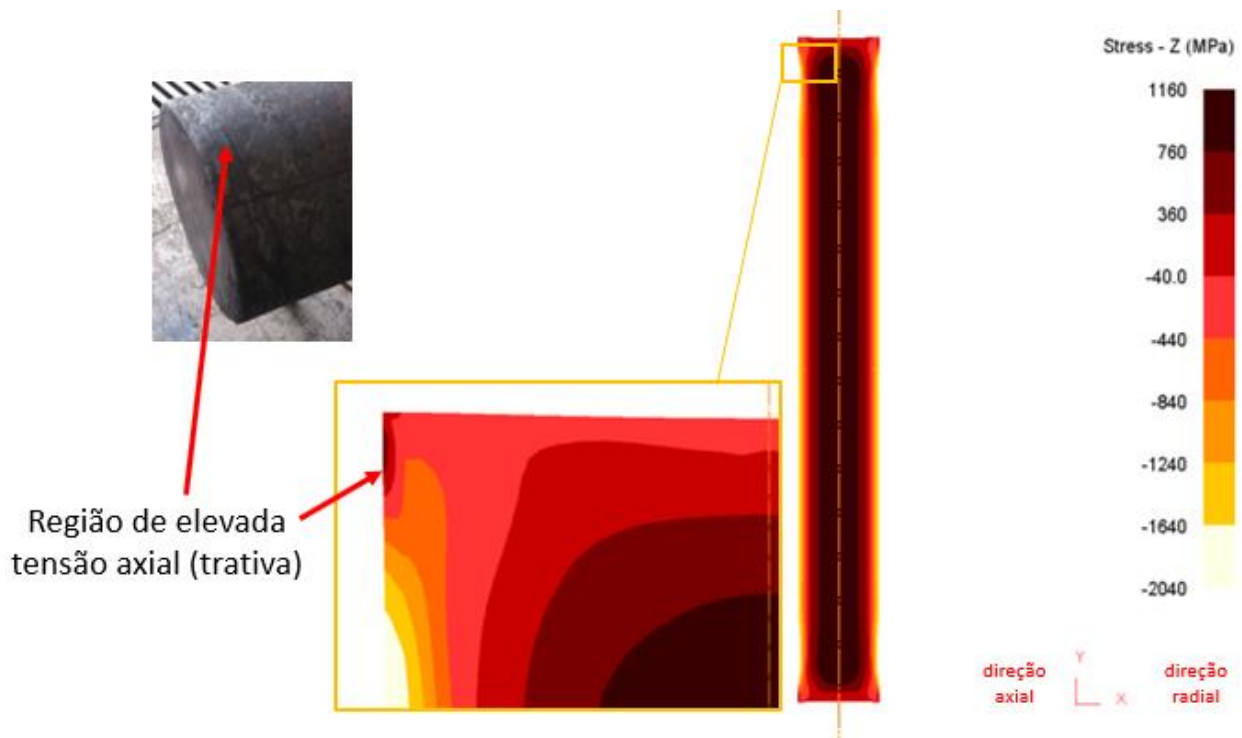


Figura 8: Correlação entre a ocorrência de fratura na direção axial e presença de tensões trativas.

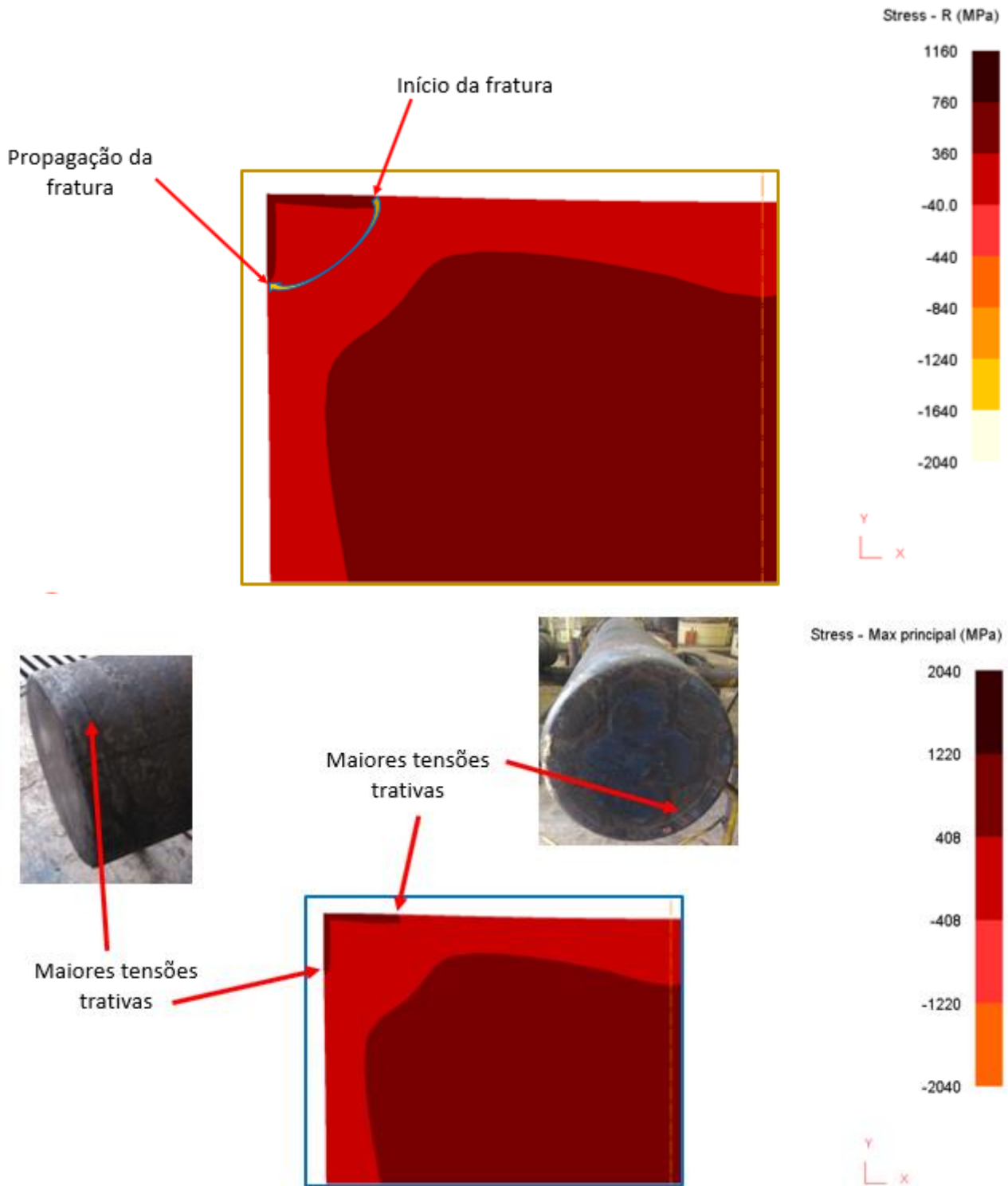


Figura 9: Mecanismo da fratura analisando as máximas tensões principais.

Mesmo sabendo-se o início e a forma de propagação das trincas, apenas com a análise das tensões não é possível compreender essa ocorrência de fratura. Para tal feito é necessário retomar a análise da formação de martensita ao longo da superfície do cilindro. Pensando em toda dinâmica do processo de têmpera: o cilindro todo austenitizado começa a formar martensita, novamente estrutura frágil e dura, de forma rápida em toda sua região externa. A martensita formada fica rígida em toda a superfície diferentemente do centro, que passando ainda pelo processo de resfriamento tende-se a contrair. Esta rigidez externa e contração interna do material acaba tensionando-o e ocasionando a fratura observada (Figura 10). Nota-se ainda uma depressão da superfície do material devido a contração que o material está sendo submetido.

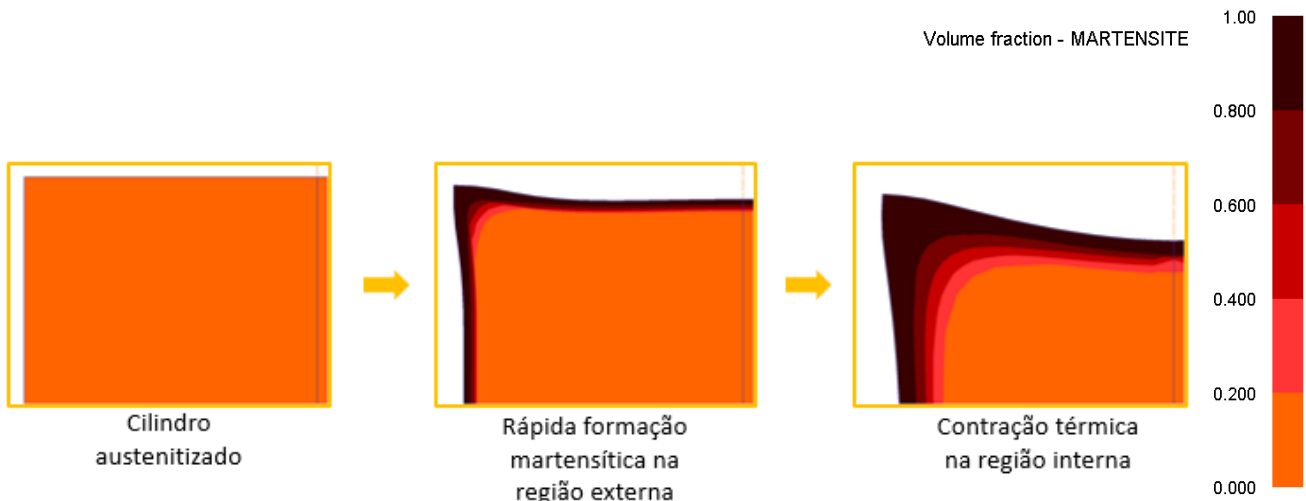


Figura 10: Mecanismo da fratura circunferencial analisando a dinâmica do processo de formação da martensita em toda a superfície (Deslocamento aumentado em 10x).

Compreendido e representado o processo industrial, foram então realizadas novas simulações afins de eliminar a formação de trincas garantindo simultaneamente a dureza superficial necessária. Para isso partiu-se do entendimento de todo o mecanismo da fratura apresentado e já analisado anteriormente. Compreendeu-se que o meio de resfriamento foi o principal atenuante para o aparecimento das tensões trativas ao final do processo. A transformação de fase ocorre então de forma brusca quanto maior for o coeficiente de transferência de calor entre a geometria e o meio em que está exposta. A Figura 11 revela que as máximas tensões principais nos pontos “1” e “2” apresentaram maiores valores de referência após resfriamento em água do cilindro. Realizando o resfriamento apenas em óleo, as máximas tensões principais se tornam negativas, ou seja, compressivas, indicando a não ocorrência de trincas. Entretanto, a formação martensítica simulada não foi considerada suficiente (Figura 12).

Fez-se várias iterações numéricas até se determinar que a melhor combinação de resfriamento seria têmpera em óleo, por cerca de 20 segundos, seguida de resfriamento em água até atingir a temperatura ambiente. Com a combinação dos meios, têmpera em óleo seguida de resfriamento em água, favoreceu-se o surgimento de martensita (Figura 12) em toda superfície e as tensões trativas foram reduzidas cerca de 60%, se comparado ao processo de têmpera em água. Esses resultados demonstraram como a nova combinação é capaz de reduzir a possibilidade da ocorrência de fraturas no cilindro analisado, devido à redução do gradiente de temperatura entre o centro e a superfície e, ainda, obter uma quantidade de martensita aceitável.

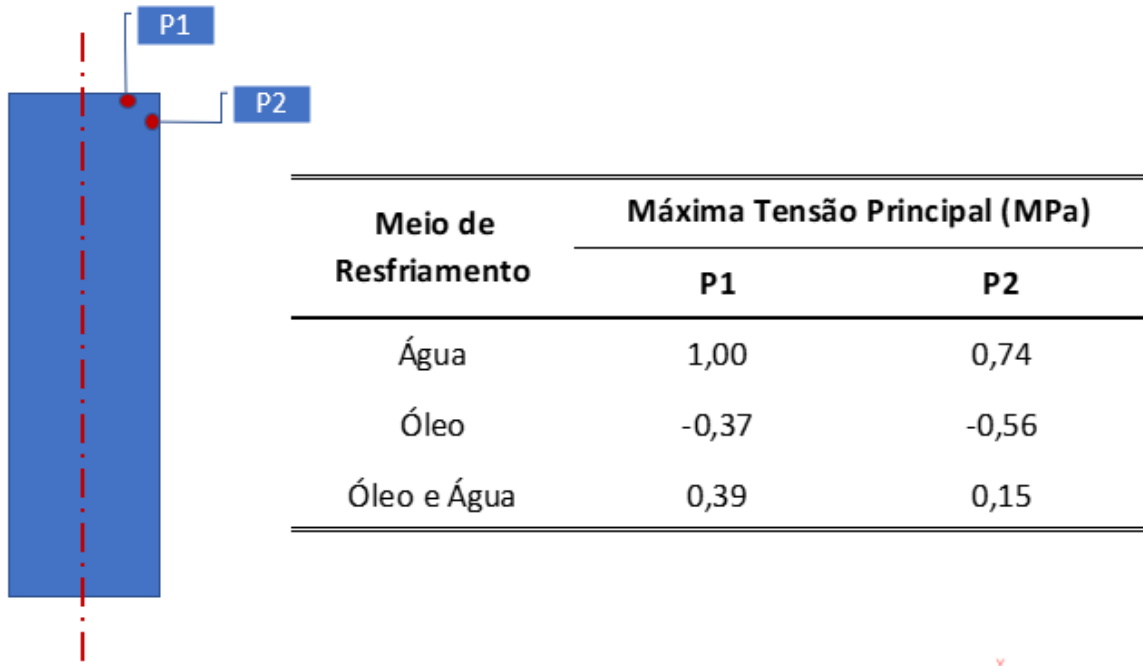


Figura 11: Análise dos meios de resfriamento e as tensões máximas envolvidas em cada processo.

O novo processo definido pode ser representado graficamente (Figura 13), levando em consideração a temperatura e o tempo de imersão em cada meio utilizado no processo de têmpera. A forma de representação gráfica mostra uma maneira prática e ágil para ser utilizado em chão de fábrica de prestadoras de serviço de tratamentos térmicos. Fornecendo ainda a possibilidade de criação de um banco de dados com as geometrias mais usuais facilitando os tryouts.

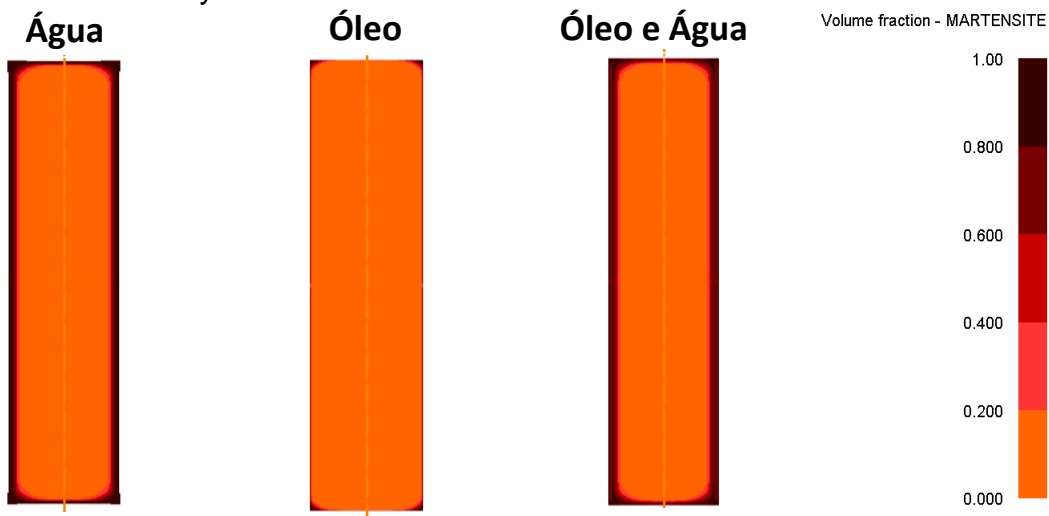


Figura 12: Análise do meio de resfriamento a) em água b) em óleo c) em óleo e água e a formação superficial de martensita.

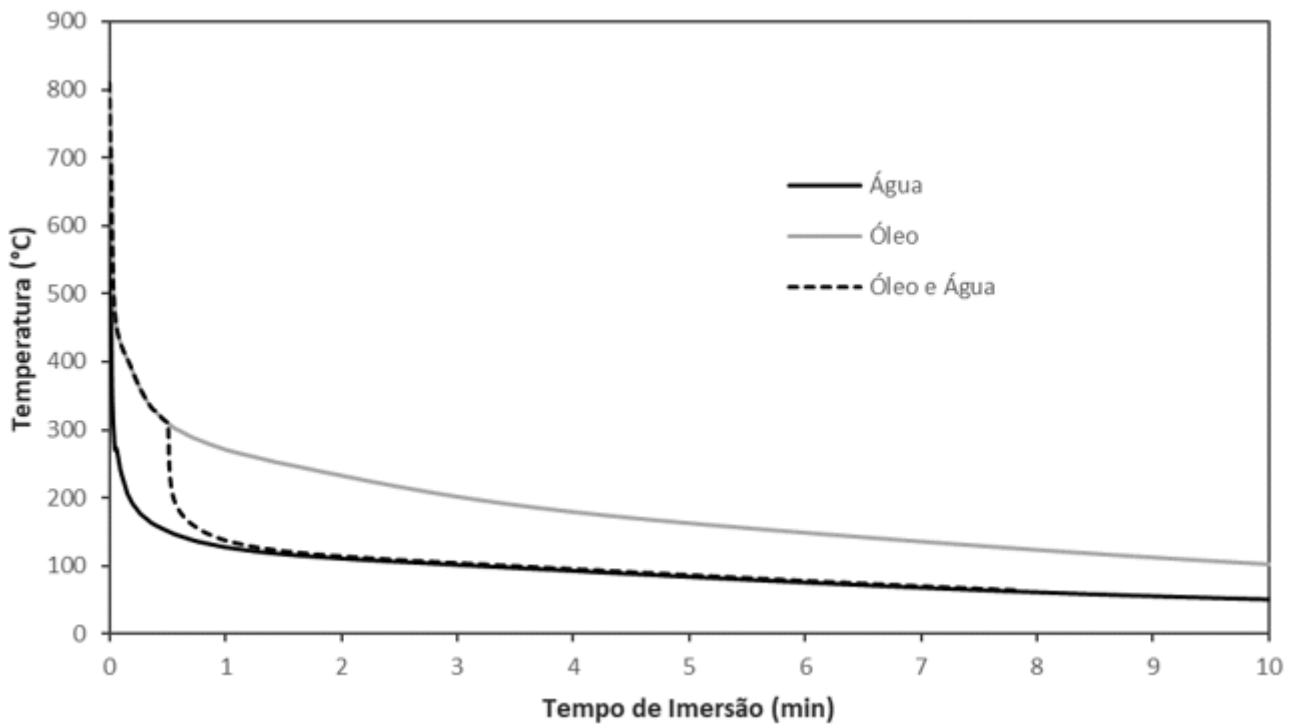


Figura 13: Representação gráfica do processo de têmpera dos diferentes meios de resfriamento de um cilindro de diâmetro de 6 ½”.

Vale ressaltar que em todos os processos simulados e representados graficamente não se levou em consideração o tempo de transferência, pois cada planta demanda um certo tempo e a simulação deve ser considerada para cada caso. Outro fator são os coeficientes de transferência térmica, os quais são específicos para cada empresa e quando definidos especificamente para cada processo otimizam o tempo e a validação do tratamento via simulação.

4 CONCLUSÃO

A partir da simulação pelo método dos elementos finitos foi possível prever a ocorrência e o mecanismo de fraturas provenientes de um processo de têmpera, levando em consideração a geometria, o meio de resfriamento e todas as tensões envolvidas ao final do processo. Com o presente estudo mostrou-se ser possível analisar cada meio de resfriamento e a influência no surgimento das tensões e formação martensítica. De acordo com as inúmeras interações permitiu-se definir um novo processo de têmpera, sendo este ocorrendo em óleo seguido de água, para um cilindro de 6 ½”, em que se reduziram as tensões principais máximas em 60%, permanecendo a dureza superficial necessária. Por fim, ficou evidenciado a importância da simulação como ferramenta em chão de fábrica para otimizar os tryouts e evitar maiores custos ao longo do processo industrial.

REFERENCES

- [1] CHIAVERINI, V. Tratamento térmicos das ligas ferrosas. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1987.
- [2] NOVIKOV, I. Teoria dos tratamentos térmicos dos metais. Rio de Janeiro: UFRJ, 1994.
- [3] AGUIAR, R. A.; Medeiros, M. Redução de Custos Via Simulação do TT. São Paulo: Industrial Heating, 2017.

- [4] Silva, A. D. et al. Aspectos de influência na simulação computacional da conformação mecânica baseada no método dos elementos finitos. 37^o Seminário de Forjamento. Porto Alegre, 2017.
- [5] Silva, A. D. et al. Distortion prediction in quenching AISI 4140 c-rings with different quenchants. 68^o Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Belo Horizonte, 2013.
- [6] Guo, Z. et al. Introduction of materials modelling into processing simulation. Materials Science Forum, 2013.
- [7] Silva, A. D. et al. Distortion in quenching an AISI 4140 C-ring - Predictions and experiments, 2012.
- [8] Dores, A. C. Simulação numérica do crescimento de diâmetro de tubos de aço sem costura durante a têmpera em tanque na vallourec soluções tubulares do brasil s.a. Curso de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, UFMG, 2018.
- [9] CETEC-MG. Laboratório de Material Didático Multimídia (Org.). Ciência dos Materiais Multimídia. Disponível em: <<http://www.cienciadosmateriais.org>>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- [10] Callister, W.; Rethwisch, D. Materials science and engineering: an introduction. Materials Science and Engineering. Vol. 94, 2007.